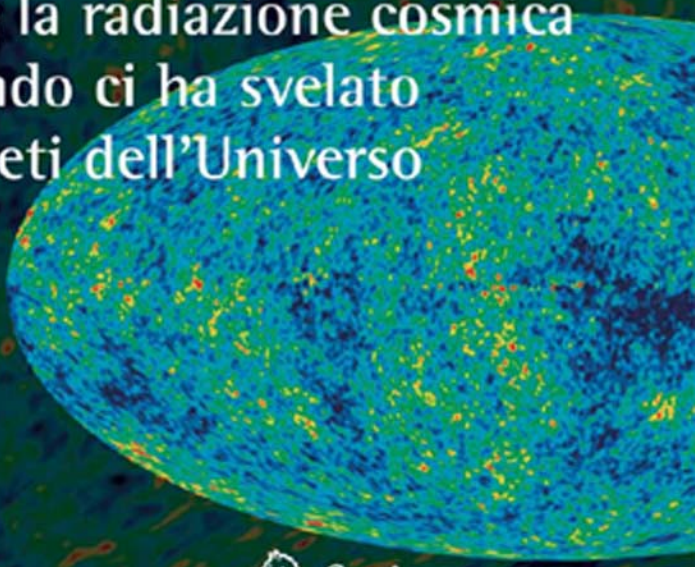
Amedeo Balbi

COLLANA LE STELLE

# La musica del Big Bang

## Come la radiazione cosmica di fondo ci ha svelato i segreti dell'Universo



Le Stelle

Springer

**Le Stelle**
Collana a cura di Corrado Lamberti

# La musica del Big Bang
## Come la radiazione cosmica di fondo ci ha svelato i segreti dell'Universo

Amedeo Balbi

le Stelle

Springer

Amedeo Balbi
Dipartimento di Fisica
Università di Roma "Tor Vergata"
www.fisica.uniroma2.it/balbi

Edizione a cura di:
Springer-Verlag Italia
Via Decembrio, 28
20137 Milano
springer.com

Gruppo B Editore
Via Tasso, 7
20123 Milano
www.lestelle-astronomia.it

Springer fa parte di
Springer Science+Business Media
© Springer-Verlag Italia 2007

ISBN 978-88-470-0612-6 Springer-Verlag Italia
ISBN 978-88-893-0820-2 Sirio

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore. Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'uso di figure e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla riproduzione su microfilm o in database, alla diversa riproduzione in qualsiasi altra forma (stampa o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. Una riproduzione di quest'opera, oppure di parte di questa, è anche nel caso specifico solo ammessa nei limiti stabiliti dalla legge sul diritto d'autore, ed è soggetta all'autorizzazione dell'Editore. La violazione delle norme comporta sanzioni previste dalla legge.
L'utilizzo di denominazioni generiche, nomi commerciali, marchi registrati ecc., in quest'opera, anche in assenza di particolare indicazione, non consente di considerare tali denominazioni o marchi liberamente utilizzabili da chiunque ai sensi della legge sul marchio.

Foto nel logo: rotazione della volta celeste; l'autore è il romano Danilo Pivato, astrofotografo italiano di grande tecnica ed esperienza
Immagine di copertina: un'immagine della radiazione cosmica di fondo, che ricostruisce lo stato dell'Universo circa 380 mila anni dopo il Big Bang. I diversi colori rappresentano lievissime variazioni nella temperatura e nella densità dell'Universo primordiale. (NASA/WMAP)
Progetto grafico della copertina: Simona Colombo, Milano
Riprodotto da copia camera-ready fornita dall'Autore
Stampa: Grafiche Porpora S.r.l., Segrate

*Stampato in Italia*
Springer-Verlag Italia S.r.l., Via Decembrio 28, I-20137 Milano

# Prefazione

Questo libro racconta la storia straordinaria della cosmologia, che negli ultimi quarant'anni è diventata a pieno titolo una scienza basata su misure e osservazioni.

È un libro che non solo gli astrofili dovrebbero leggere, ma anche gli astronomi professionisti e soprattutto i giovani studenti e ricercatori, perché tratta un argomento fra i più complessi con estrema chiarezza e semplicità, e con grande rigore scientifico. L'autore mostra come la fisica che sperimentiamo nella vita di tutti i giorni possa spiegare anche fenomeni avvenuti quasi 14 miliardi di anni fa, eventi che hanno lasciato tracce debolissime, che pure ci permettono di ricostruire l'evoluzione dell'Universo a partire da una frazione infinitesima di secondo da quello che chiamiamo il Big Bang. Leggendo questo bel lavoro, ci si rende davvero conto di come l'astrofisica e la cosmologia siano una mirabile palestra di fisica, in cui tutti i campi di questa scienza trovano applicazioni nell'interpretazione di ciò che osserviamo dell'Universo.

La prima osservazione di grande importanza cosmologica la dobbiamo a Edwin Hubble, negli anni '20 del secolo scorso. Studiando gli spettri di quelle che allora venivano chiamate "nebulose", egli cercava di capire quale fosse la loro vera natura: nubi di gas o ammassi di stelle come la Via Lattea? Oltre a scoprire che alcune nebulose erano effettivamente nubi di gas, mentre altre, specie quelle di forma regolare, a spirale, sferiche o el-

littiche, erano grandiose famiglie stellari, poeticamente indicate come universi-isole, prima che venissero battezzate semplicemente "galassie", l'astronomo americano scoprì la legge che è a fondamento della moderna cosmologia e che porta il suo nome: tutte le galassie hanno una velocità di allontanamento da noi che cresce proporzionalmente alla loro distanza.

La legge di Hubble, insieme al termine Big Bang, si prestano ancora oggi a fraintendimenti e interpretazioni del tutto sbagliate. Chi è digiuno di astronomia si immagina infatti che ci sia stata una grande esplosione che scaraventò le galassie in tutte le direzioni e finisce col ritenersi al centro dell'Universo, come ai tempi di Tolomeo. In realtà, la legge di Hubble non ci dice che le galassie si muovono nello spazio fuggendo via da noi; invece, è lo spazio che si espande e che trascina con sé le galassie. La stessa espansione produce un allungamento di tutte le distanze e quindi anche della lunghezza d'onda della luce emessa dalle galassie: per questo, gli spettri di lontane galassie ci appaiono "spostati" verso lunghezze d'onda maggiori, ossia verso la regione del rosso nella banda visuale.

La scoperta dell'espansione dell'Universo, che, secondo il modello evolutivo del Big Bang, avrebbe avuto origine da un punto a temperatura e densità infinite, non fu ritenuta accettabile da molti insigni scienziati, in particolare da Fred Hoyle, Hermann Bondi e Tommy Gold, che, negli anni '50 e '60, sostennero l'ipotesi alternativa dell'Universo stazionario, secondo la quale l'energia dell'espansione si trasformava in energia di creazione della materia, in modo tale da mantenere costante la densità media dell'Universo. La disputa fra i sostenitori dei due modelli durò accanita fino alla metà degli anni '60, quando venne effettuata la seconda capitale osservazione cosmologica: la scoperta della radiazione fossile, oggetto di questo libro, la cui esistenza era stata prevista nel 1948 da un sostenitore del modello evolutivo, George Gamow.

La scoperta di Arno Penzias e Robert Wilson, effettuata con un'antenna destinata in origine a studi tutt'altro che cosmologici, e precisamente per ricevere le trasmissioni dei primi satelliti artificiali, rappresentò la pietra tombale per il modello stazionario, perché testimoniava un passato ad altissima temperatura per il nostro Universo.

Di colpo, era diventato possibile calcolare temperatura e densità del Cosmo primordiale a partire dai valori che si osservano ai nostri giorni, e quindi ricostruire lo stato fisico dei primi istanti di vita dell'Universo, per scoprire che v'erano le condizioni necessarie perché dalla zuppa di particelle elementari si formassero protoni e neutroni, e poi si producessero le reazioni nucleari primordiali con formazione di idrogeno pesante (il deuterio), isotopi dell'elio e litio. Il confronto delle abbondanze calcolate di questi elementi che si formarono nei primi minuti con quelle effettivamente osservate oggi nell'Universo è tanto buono da costituire un'altra formidabile prova a favore del modello evolutivo.

Ma restava un interrogativo che lasciava perplessi i cosmologi: le osservazioni di Penzias e Wilson parlavano di un rumore perfettamente uniforme in tutte le direzioni. Eppure, l'Universo presenta grosse disuniformità, ammassi di galassie, galassie e stelle, grumi di materia separati l'uno dall'altro da enormi spazi praticamente vuoti. I semi di queste disuniformità dovevano essere presenti nella radiazione fossile, ma la strumentazione usata era troppo primitiva per rivelarli, e inoltre il rumore della nostra stessa atmosfera era una grave causa di disturbo.

Amedeo Balbi ci racconta i passi successivi della storia, la realizzazione da parte della NASA del satellite COBE che riesce finalmente a mettere in evidenza, nel 1992, la presenza di regioni più fredde e regioni più calde della media, che è di 2,7 gradi assoluti: per rendersi conto della difficoltà di queste misure, si tenga presente che più freddo o più caldo significa differenze di qualche centomillesimo di grado dal valore medio. COBE ci mostrò la "fotografia" dell'Universo bambino, la più remota immagine che possiamo osservare dell'epoca in cui, circa 400 mila anni dopo il Big Bang, il miscuglio di protoni, elettroni, particelle alfa diventò un gas neutro: protoni e particelle alfa attrassero a sé i loro elettroni, e i fotoni, che prima rimbalzavano avanti e indietro fra le particelle cariche, poterono propagarsi liberamente fino a noi.

Questa prima "fotografia" del COBE, però, era molto sfocata: i dettagli più minuti distinguibili avevano dimensioni angolari pari a circa $7^\circ$. Come se guardando il cielo non potessimo vedere distintamente dettagli che siano angolarmente più piccoli di 14

dischi lunari messi in fila uno accanto all'altro.

COBE aveva rappresentato un grande passo avanti, ma non bastava. La storia prosegue allora con le osservazioni da pallone da parte di due diversi esperimenti, BOOMERANG e MAXIMA, che erano molto meno costosi di un satellite, ma potevano osservare solo una ristretta zona di cielo, dato il tempo limitato di permanenza del pallone nella stratosfera. Però, a differenza di COBE, la loro vista era molto più acuta: loro ci hanno mostrato dettagli più piccoli di $1^\circ$. È incredibile la messe di informazioni che si possono ricavare da queste osservazioni, e, in seguito, da quelle fatte da un altro satellite, il WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) della NASA, dedicato a David Wilkinson, uno dei principali autori del progetto, scomparso prematuramente.

Da tutte queste "fotografie", ora molto più dettagliate, si deduce che l'Universo è piatto, obbedisce cioè alla geometria euclidea. Questo libro spiega chiaramente come si sia arrivati a questo risultato e quali sono le conseguenze: il contenuto dell'Universo è per il 4% normale materia barionica, quella di cui sono fatte le stelle, la Terra, noi stessi; per il 22% di quella misteriosa materia oscura che fa sentire la sua presenza per la sua forza di attrazione gravitazionale, ma che non emette alcun tipo di radiazione; il restante 74% necessario per raggiungere la densità critica che caratterizza l'Universo piatto è energia oscura, quell'energia che accelera l'espansione cosmica, che non sappiamo cosa sia e che siamo portati a credere che rappresenti l'energia del vuoto. Il vuoto fisico, infatti, è tutto un pullulare di particelle estremamente instabili che appaiono e scompaiono in frazioni infinitesime di secondo.

Altre informazioni sono contenute nell'immagine dell'Universo bambino, ma ancora non ci appaiono chiare. Strumenti ancora più raffinati sono necessari per estrarle tutte. Gli ultimi tre capitoli del libro spiegano in modo molto chiaro e dettagliato cosa si è potuto dedurre e cosa potremo ancora cercare per giungere a una migliore comprensione dei primi istanti di vita dell'Universo, della formazione delle prime stelle, e come tutte queste osservazioni siano una conferma di quella strana ipotesi *ad hoc*, che è detta *inflazione*, proposta nel 1981 dal fisico teorico Alan Guth per spiegare l'improbabile piattezza dell'Universo e la sua uniformità.

Di un bel libro si usa dire che si legge come un romanzo. In questo caso è davvero il romanzo della cosmologia, dei successi e degli insuccessi di una scienza che pretende di ricostruire avvenimenti lontani 14 miliardi di anni luce, avvenuti quando non c'erano né stelle né galassie, ma solo un'informe zuppa di particelle elementari. Una storia del ruolo giocato dall'immaginazione, dall'intelligenza, ma anche dalle scoperte avvenute per caso.

*Trieste, gennaio 2007* *Margherita Hack*

# INDICE


PREFAZIONE (DI MARGHERITA HACK) v

PROLOGO 1

1 LO SCENARIO 7
La grande fuga 8
Gravità estrema 15
Il peso di tutte le cose 21
Questione di forma 25
Per un pugno di numeri 31

2 PRIMA LUCE 37
Ma che caldo fa 38
Onda su onda 41
Stelle e forni 46
Alta cucina 50
Il lungo addio 54
Rumori fuori scena 60
Una prova scottante 66

3 SEMI COSMICI 71
Instabilità 72
Tutto liscio (o quasi) 76
I giganti del Cosmo 80
Via, più veloce della luce! 86
Caos primordiale 94
Il regno delle tenebre 98

Avanzi nel microonde 105

4 Musica delle sfere 113
Suoni e numeri 115
Sinfonie cosmiche 122
Ascoltare con gli occhi 127
Per picchi e per valli 134

5 Armonia svelata 143
In cerca dell'Eldorado 144
L'Universo visto dal pallone 147
Un mondo piatto 151
Qualcosa che sfugge 161
Espansionismo cosmico 164
Echi della creazione 167

6 Terra incognita 177
Il lato oscuro del Cosmo 178
L'Universo e il pallone da calcio 186
Una nuova frontiera 194
Verso l'inizio 199

Epilogo 209

Ringraziamenti 211

Indice analitico 213

*Ai miei genitori*

# Prologo

*Tutta la scienza è cosmologia.*

Karl Popper, *La logica della scoperta scientifica*

Ci sono domande che l'umanità si è posta fin dalla sua infanzia. L'Universo ha avuto un inizio? Se sì, quanto è vecchio, e cosa c'era prima? Finirà un giorno, o durerà in eterno? Che forma ha? Quanto è grande? Di che cosa è fatto? La storia del pensiero umano è costellata di miti affascinanti e di intuizioni geniali, con le quali, nel corso dei millenni, si è tentato di dare una soluzione a questi quesiti. Ogni popolo ha avuto le sue leggende, i suoi racconti sulla creazione del mondo, le sue speculazioni filosofiche, le sue credenze religiose. La scienza moderna, però, non si accontenta di spiegazioni fantasiose, per quanto suggestive. Oggi, le nostre teorie sull'Universo, costruite in base a deduzioni razionali, devono passare il severo vaglio delle osservazioni e degli esperimenti.

La cosmologia, la scienza che studia l'origine e l'evoluzione dell'Universo, ha dovuto superare enormi difficoltà prima di essere considerata alla pari con altre aree della fisica. Dapprima, non aveva modelli fisici e strumenti matematici adatti ad affrontare la complessità dei problemi che le si presentavano. In seguito, ha sofferto di una cronica carenza di dati sperimentali, cosa che rendeva praticamente impossibile mettere alla prova le speculazioni teoriche. In queste condizioni, pensare di poter rispondere con rigore ai tanti interrogativi sulla natura dell'Universo sembrava una pia illusione. Oggi, però, le cose sono

cambiate. Viviamo nell'epoca d'oro della cosmologia: un momento straordinario, in cui per la prima volta siamo in grado di comprendere l'Universo grazie alle armi dell'indagine scientifica.

Uno dei maggiori cosmologi viventi, James Peebles, ha paragonato la situazione di chi studia la vastità del Cosmo a quella di Tantalo. Secondo il mito, Tantalo era stato punito da Zeus per aver scoperto i segreti dell'ambrosia, il cibo che rendeva immortali gli dei. Condannato a soffrire la fame e la sete, fu immerso nell'acqua fino al collo, ma tutte le volte che tentava di berne, l'acqua si ritirava. Sopra il suo capo pendevano frutti invitanti e succosi, ma tutte le volte che provava ad allungare le mani per cibarsene, questi si allontanavano. Allo stesso modo, i cosmologi possono osservare gli oggetti celesti quanto vogliono, ma non li possono toccare. Questo è uno dei fatti che mette la cosmologia in una situazione di svantaggio rispetto agli altri campi della fisica. Se vogliamo studiare le caratteristiche di un materiale, possiamo procurarcene una certa quantità e analizzarla in laboratorio, sotto condizioni controllabili e riproducibili; possiamo inoltre ripetere l'esperimento un numero di volte pressoché arbitrario. Niente di tutto questo è consentito al cosmologo: egli ha a disposizione un solo Universo, può solo guardarlo per come è, e non può decidere le condizioni ambientali in cui si svolge la sua osservazione.

Inoltre, la materia di studio del cosmologo è per sua natura di difficile accesso. Scandagliare i remoti angoli del Cosmo, osservare la flebile luce proveniente da distanze al di là di ogni immaginazione, richiede strumenti sofisticatissimi, che solo di recente i progressi tecnologici sono stati in grado di mettere a disposizione per la prima volta. La storia della cosmologia, in misura forse ancor più drammatica che per altre scienze, è anche una storia degli strumenti necessari a osservare il mondo. La nostra idea dell'Universo si è andata plasmando nel corso dei secoli in funzione di ciò che riuscivamo a vederne. Dal cannocchiale di Galileo in poi, il Cosmo è diventato sempre più strano e più affascinante man mano che lo si osservava meglio.

Per una strana forma di compensazione, però, è proprio la vastità del Cosmo a fornirci uno strumento insperato per studiarne le proprietà. L'Universo è talmente grande che la luce stessa, che si propaga nello spazio cosmico alla massima velocità

consentita in natura (circa 300 mila chilometri al secondo), impiega tempi enormi per attraversarlo. Così, quando osserviamo un oggetto celeste, lo vediamo non com'è ora, ma com'era quando la luce che riceviamo ha lasciato la sua superficie. Quando guardiamo il Sole, lo vediamo com'era circa 8 minuti fa; quando guardiamo la stella più vicina al Sole, *alfa* Centauri, la vediamo com'era circa 4 anni fa; la galassia più vicina alla nostra, M31 in Andromeda, ci appare com'era circa due milioni e mezzo di anni fa, e così via. I cosmologi misurano queste enormi distanze proprio in *anni luce*, lo spazio che la luce percorre in un anno di cammino: 1 anno luce corrisponde alla enorme distanza di 9 460 miliardi di chilometri.

I cosmologi hanno quindi a disposizione una specie di macchina del tempo. Essi possono guardare l'Universo in differenti fasi della sua evoluzione e ricostruirne la storia, quasi come farebbe un archeologo osservando i fossili provenienti da epoche differenti. Cogliendo questa straordinaria opportunità, e perfezionandone l'uso con l'aiuto di strumenti sempre più sofisticati, la cosmologia ha cominciato a uscire dallo stato di scienza minore in cui versava fino all'inizio del XX secolo, per incamminarsi lungo un faticoso percorso che l'ha portata, negli ultimi anni, a diventare una delle aree di ricerca più avanzate e di maggior successo.

Oggi sappiamo, ad esempio, che l'Universo si espande ed evolve, e che ha raggiunto le sue condizioni attuali partendo da uno stato più semplice, in cui era molto più piccolo e denso di quanto sia oggi. Spingendo sempre più indietro nel tempo la descrizione fisica dell'Universo, si giunge a una situazione di densità e temperatura praticamente infinite, che ha avuto luogo circa 14 miliardi di anni fa, e che è ormai nota a tutti con il nome di *Big Bang*. Il modello cosmologico basato sul Big Bang è straordinariamente efficace nel descrivere l'evoluzione dell'intero Universo, e allo stesso tempo sorprendentemente semplice. Bastano una manciata di parametri per caratterizzare lo stato fisico del Cosmo su un arco temporale che va da una minuscola frazione di secondo dopo l'origine fino al presente. I punti fondamentali del modello cosmologico del Big Bang sono illustrati nel capitolo 1 di questo libro.

Nella loro incessante ricerca sulle origini dell'Universo, i co-

smologi hanno a un certo punto iniziato a chiedersi quanto lontano nello spazio, e quindi quando indietro nel tempo, essi potessero spingersi con le loro osservazioni. È possibile guardare direttamente il momento in cui l'Universo è venuto alla luce? Nelle sue primissime fasi di vita, l'intero Universo era incredibilmente caldo e luminoso. Inizialmente, la sua luce non poteva fare molta strada, ostacolata com'era dalla densa nube di materia che pervadeva il Cosmo. Ma dopo poche centinaia di migliaia di anni l'Universo è diventato trasparente, e la luce ha potuto finalmente diffondersi e viaggiare liberamente nello spazio. Oggi, dopo più di 13 miliardi di anni, una traccia dell'immenso bagliore iniziale continua a giungere fino a noi dalle più remote profondità del tempo e dello spazio. Sebbene di quella tremenda fiammata non sia rimasto nel frattempo altro che una fredda brace, possiamo ancora rivelarne la presenza. Essa pervade tutto lo spazio, si trova tutto intorno a noi, ovunque ci troviamo. Se sintonizziamo la nostra radio su un canale vuoto, circa l'un per cento del rumore che sentiamo è costituito proprio da questo segnale cosmico, il più distante e antico che possiamo ricevere nell'Universo. Questa testimonianza fossile del Big Bang si chiama *radiazione cosmica di fondo*, ed è la vera protagonista di questo libro. È un mezzo straordinario per ricostruire lo stato fisico dell'Universo nelle sue primissime fasi di vita. A una spiegazione dettagliata della sua origine e al racconto della sua scoperta è dedicato il capitolo 2.

Il Cosmo delle origini era il regno della semplicità: una specie di nebbia indifferenziata pervadeva tutto lo spazio, e ogni suo punto aveva condizioni di densità e temperatura pressoché identiche. Ma questa estrema uniformità era alterata impercettibilmente dalla presenza di minuscoli grumi, intorno ai quali la materia andava addensandosi in un processo lento, ma inesorabile. Da questi antichi semi cosmici hanno preso forma le gigantesche strutture che osserviamo nel Cosmo attuale: le galassie, gli immensi grappoli di galassie chiamati ammassi, e strutture ancora più grandi, ammassi di ammassi, che vanno formandosi ancora oggi. La nostra stessa esistenza, in fondo, è dovuta proprio alle lievi imperfezioni esistenti nell'Universo primordiale. Nel capitolo 3, illustrerò quello che sappiamo del modo in cui questi semi primitivi hanno avuto origine, e come abbiamo

potuto rivelarne l'esistenza dalle tracce che hanno lasciato nella radiazione cosmica di fondo.

Quando l'Universo era ancora pervaso da una nebbia di particelle che diffondeva il bagliore primitivo, e la materia cominciava ad addensarsi per formare le prime strutture cosmiche, ebbe inizio una straordinaria lotta tra forze contrapposte. La gravità spingeva la materia ad accumularsi sempre di più intorno ai semi cosmici, ma, proprio come avviene quando tentiamo di comprimere un gas, la pressione interna opponeva resistenza, costringendo la materia a riespandersi. Ciò diede vita a una specie di danza, un alternarsi di compressioni e rarefazioni del fluido cosmico. Queste periodiche oscillazioni erano del tutto simili a quelle che attraversano l'aria quando si propaga un suono: l'Universo primordiale diventò la sede di vere e proprie onde acustiche in viaggio da un punto all'altro dello spazio. Nel complicato sovrapporsi di queste onde, che i cosmologi possono oggi ricostruire osservando le lievi increspature rimaste impresse nella radiazione cosmica di fondo, è nascosta la chiave che può farci comprendere molti dei segreti del Cosmo. Come ogni strumento musicale produce un suo spettro caratteristico di frequenze, così i parametri che definiscono la natura del nostro Universo si manifestano conferendo un timbro inconfondibile alle onde acustiche primordiali. La caccia a questa "musica" del Big Bang ha impegnato i cosmologi in uno sforzo durato decenni. I capitoli 4 e 5 trattano diffusamente di questa affascinante impresa, e raccontano di come essa abbia finalmente avuto successo solo pochi anni fa.

Nel corso di questo libro, dunque, vedremo come, grazie allo studio minuzioso della radiazione cosmica di fondo, siamo oggi in grado, per la prima volta nella storia dell'umanità, di rispondere a domande fondamentali riguardo alla natura del Cosmo. Sappiamo che l'Universo si espande da quasi 14 miliardi di anni e forse continuerà a espandersi per sempre. Sappiamo che la grandiosa architettura di galassie che ne costituisce la struttura si è formata lungo miliardi di anni a partire da minuscoli semi primordiali. Sappiamo inoltre che la materia di cui è fatto il Cosmo è in gran parte di un tipo completamente diverso da quella di cui siamo fatti noi stessi, e che probabilmente bisogna mettere nel conto anche l'esistenza di un ulteriore tipo di energia

ancora più misteriosa. Ma così come non possiamo non rimanere sbalorditi dagli enormi passi avanti che la comprensione dell'Universo ha compiuto negli ultimi anni, allo stesso tempo non abbiamo il diritto di credere di aver esaurito tutte le domande. Ogni nuova risposta apre nuovi interrogativi. Ad alcune delle questioni irrisolte della cosmologia moderna è dedicato il capitolo 6.

# ·1·

# Lo scenario

*Si capisce che si stava tutti lì, – fece il vecchio Qfwfq, – e dove, altrimenti? Che ci potesse essere lo spazio, nessuno ancora lo sapeva. E il tempo, idem: cosa volete che ce ne facessimo, del tempo, stando lì pigiati come acciughe?*
*Ho detto "pigiati come acciughe" tanto per usare una immagine letteraria: in realtà non c'era spazio nemmeno per pigiarci. Ogni punto d'ognuno di noi coincideva con ogni punto di ognuno degli altri in un punto unico che era quello in cui stavamo tutti.*

Italo Calvino, *Tutto in un punto (Le Cosmicomiche)*

La scienza ha iniziato relativamente tardi a usare il suo metodo per indagare i misteri del Cosmo. Le prime idee scientificamente valide sulla natura dell'Universo risalgono al XVI secolo, quando Niccolò Copernico, Tycho Brahe e Giovanni Keplero fondarono il modello di Sistema Solare che ancora oggi usiamo per interpretare il moto dei pianeti. L'idea di una Terra immobile, centro dell'intero Universo, fu rimpiazzata da quella che la considerava un pianeta come gli altri, in orbita intorno al Sole. Nel XVII secolo le osservazioni di Galileo Galilei consolidarono la nuova visione del mondo, e le teorie di Isaac Newton le diedero una solida base formale. Nei secoli che seguirono, dominò la concezione newtoniana che lo spazio fosse assoluto e immutabile, e più tardi si fece strada il pregiudizio che l'Universo fosse con ogni probabilità eterno. L'idea di un Universo eterno elude qualsiasi

domanda sulla sua origine e il suo destino: l'Universo c'è perché c'è sempre stato, e sarà lo stesso per sempre. Bisognò attendere l'inizio del XX secolo perché un nuovo mutamento prospettico rendesse possibile la nascita della cosmologia moderna.

Oggi, il modello scientificamente accettato su cui basiamo la nostra comprensione dell'Universo è il *modello del Big Bang*. Secondo questo modello, l'Universo ha iniziato la sua evoluzione in un momento ben preciso nel passato, attraversando nel corso di miliardi di anni stati fisici radicalmente diversi, che lo hanno portato a essere quello che attualmente è. Come è noto, "big bang" significa semplicemente "grande botto": l'appellativo fu coniato da Fred Hoyle, il grande astronomo britannico che in realtà fu, lungo tutta la sua carriera, uno dei più fermi oppositori di questo modello cosmologico. Malgrado gli intenti apertamente ironici del suo autore, il nome Big Bang ha riscosso un'enorme popolarità. Va però sottolineato che esso è piuttosto fuorviante: la nascita dell'Universo, infatti, non ha molto a che fare con un'esplosione. Come vedremo nei capitoli successivi, nel corso dell'ultimo secolo il modello del Big Bang è stato sottoposto a numerosi riscontri osservativi, e i cosmologi lo considerano ormai quello in grado di fornire la migliore descrizione della struttura e dell'evoluzione dell'Universo, almeno entro i limiti in cui esso è applicabile. Cerchiamo allora di capire un po' più in dettaglio che cos'è il modello del Big Bang e su cosa si basa.

## La grande fuga

Quando osserviamo il cielo notturno, se siamo abbastanza fortunati da farlo in un posto lontano dalle luci delle città, magari in montagna o in alto mare, lo spettacolo che si presenta al nostro sguardo è sbalorditivo. Stelle a perdita d'occhio, in ogni direzione. Addirittura, lungo la striscia luminosa che gli antichi chiamavano Via Lattea ce ne sono talmente tante che è impossibile distinguerle una per una senza un telescopio. Verso la fine del XVIII secolo, l'astronomo William Herschel dimostrò per la prima volta che tutte le stelle del nostro cielo, e il nostro stesso Sole, fanno parte di un unico vasto agglomerato, che ha più o meno la forma di un disco spesso (come una specie di frittata).

Gli astronomi chiamano un insieme di stelle di questo tipo una *galassia*. Quando osserviamo la Via Lattea, vediamo un maggior numero di stelle semplicemente perché stiamo guardando lungo la direzione più densa della Galassia (cioè lungo il disco).

Oggi sappiamo che la nostra Galassia, che abbiamo continuato a chiamare Via Lattea, ha dimensioni enormi: ha un diametro di circa 100 mila anni luce, è spessa circa 10 mila anni luce, e contiene centinaia di miliardi di stelle. Sappiamo anche che il Cosmo si estende su dimensioni immensamente più vaste di quelle della Via Lattea e che contiene centinaia di miliardi di altre galassie simili alla nostra. Ma ancora alle soglie del XX secolo erano ben pochi coloro che pensavano che l'Universo andasse molto al di là della nostra isola cosmica: la Via Lattea sembrava contenere tutto ciò che esisteva.

In realtà, già ai tempi di Herschel erano stati osservati nel cielo notturno molti oggetti che non potevano essere singole stelle: deboli batuffoli di luce, alcuni di forma più allungata, altri di forma più tondeggiante. Di questi oggetti, che furono chiamati *nebulose* (dal latino *nebula*, nuvola), non era possibile stabilire né la distanza, né tantomeno la vera natura. Per gli astronomi del XVIII secolo, le nebulose facevano parte della Via Lattea, ed erano con ogni probabilità nient'altro che sbuffi di materiale interstellare. Il filosofo Immanuel Kant fu il primo a sostenere che esse dovevano essere invece aggregazioni di stelle esterne alla Via Lattea, perché, secondo lui, l'Universo doveva necessariamente essere eterno e infinito.

La questione si trascinò a lungo, dividendo gli astronomi in due fazioni: quelli che ritenevano che le nebulose facessero parte della nostra Galassia, e quelli che invece le consideravano altre galassie sparse in un Universo molto più grande della Via Lattea. Bisognò attendere fino al 1924, perché l'astronomo statunitense Edwin Hubble potesse risolvere la questione della natura delle nebulose e segnare la nascita della moderna visione cosmologica. Sfruttando lo strumento astronomico più potente dell'epoca, il telescopio da 2,5 m di Mount Wilson, in California, e facendo tesoro degli studi dell'astronoma Henrietta Leavitt, che nel 1912 aveva scoperto un metodo estremamente preciso per determinare la distanza di un tipo particolare di stelle, le *Cefeidi*, Hubble riuscì a determinare la distanza di una delle nebulose

più imponenti: M31 in Andromeda, facilmente visibile anche a occhio nudo in condizioni ottimali. Analizzando le sue osservazioni, Hubble concluse che M31 doveva trovarsi a circa 900 mila anni luce dalla Terra: una distanza di gran lunga maggiore delle dimensioni della Via Lattea (oggi sappiamo che in realtà è ancora più lontana di quanto stimato inizialmente da Hubble e si trova a oltre 2 milioni di anni luce di distanza). Trovandosi a una distanza così grande, M31 poteva essere visibile soltanto se avesse contenuto un numero enorme di stelle, pari a quelle dell'intera Via Lattea. Si trattava quindi senza dubbio di un'altra galassia. La scoperta di Hubble rendeva così improvvisamente l'Universo un posto vastissimo, sorprendentemente più grande di quello che sarebbe sembrato ragionevole aspettarsi. Un assurdo spreco di spazio, insomma.

Dopo aver raggiunto un risultato così straordinario e avere ottenuto fama mondiale risolvendo una controversia che era andata avanti per secoli, Hubble non riposò sugli allori. Aiutato dal suo assistente Milton Humason (inizialmente un semplice facchino dell'Osservatorio di Mount Wilson, che col tempo era diventato un abilissimo e meticoloso osservatore), egli continuò a determinare la distanza di molte altre nebulose, provando definitivamente che si trattava di galassie separate dalla nostra[1]. Nel 1929, dopo aver analizzato le osservazioni di decine di queste galassie, Hubble e Humason annunciarono di aver fatto un'altra scoperta, ancora più sorprendente. Di alcune galassie, essi erano riusciti a determinare, oltre che la distanza, anche la velocità. Fino ad allora si era sempre pensato che le galassie occupassero una posizione fissa nel Cosmo, oppure che, nel caso stessero muovendosi, lo facessero in maniera casuale, senza alcuna relazione tra loro. Hubble si accorse invece che tutte le galassie sembravano allontarsi dalla Via Lattea. A un risultato analogo era già pervenuto anni prima l'astronomo Vesto Slipher, ma ora Hubble disponeva di un maggior numero di osservazioni.

Le cose si rivelarono ancora più strane quando Hubble mise la velocità delle galassie e la loro distanza in un grafico (figura 1.1). Tentando di stabilire una relazione tra le due quantità,

[1] Esistono in effetti oggetti che fanno parte della Via Lattea e che sono composti di nubi di materiale interstellare: non hanno nulla a che vedere con le galassie e vengono chiamati ancora oggi nebulose.

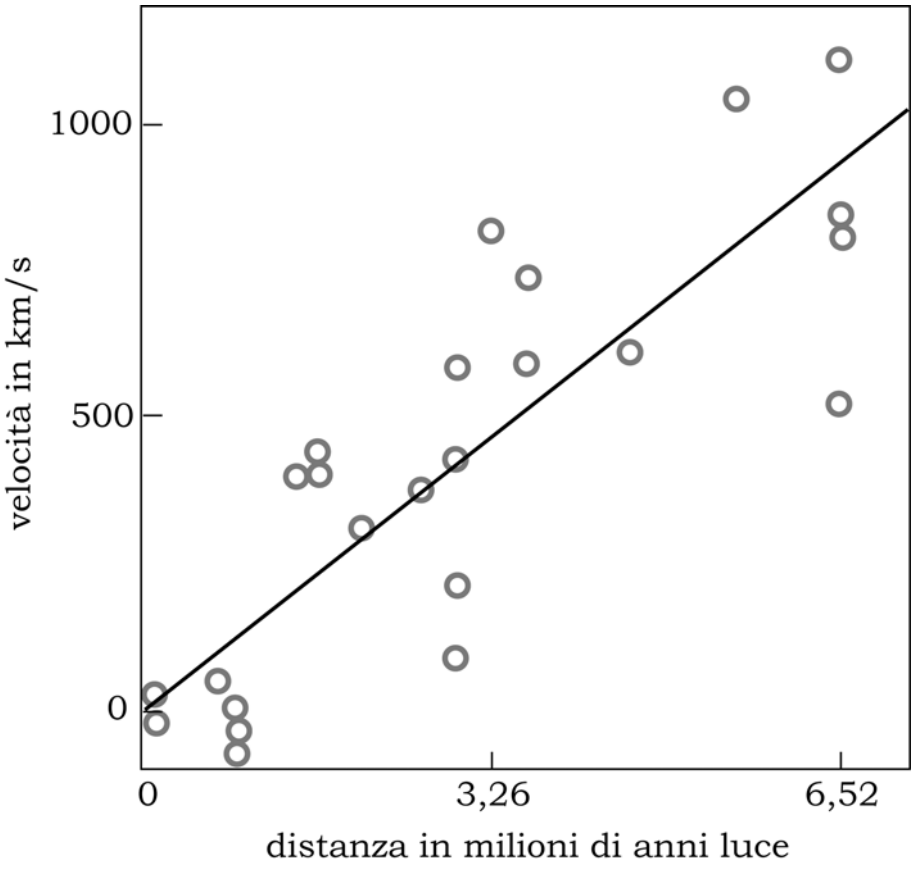



Figura 1.1: I dati originali di Hubble suggerivano una crescita lineare della velocità delle galassie all'aumentare della loro distanza da noi. Questa legge è stata poi confermata con precisione sempre maggiore dalle osservazioni più recenti. (Figura adattata dall'articolo di Hubble e Humason del 1929)

Hubble si accorse che esse seguivano una legge ben precisa: le galassie sembravano allontanarsi dalla Via Lattea con una velocità proporzionale alla loro distanza. In altre parole, una galassia lontana il doppio di un'altra galassia sembrava allontanarsi con una velocità due volte maggiore. Questo fatto, che per dire il vero non era di evidenza cristallina nei primi dati raccolti, fu confermato dallo stesso Hubble con osservazioni più accurate nel 1931. In seguito, questa apparente fuga delle galassie è

sempre stata confermata da ogni nuova osservazione e costituisce uno dei capisaldi della cosmologia moderna. La legge che lega la velocità delle galassie alla loro distanza si chiama *legge di Hubble*, in onore del suo scopritore.

A prima vista, l'esistenza della legge di Hubble è un fatto estremamente fastidioso, che dovrebbe come minimo portarci a considerare con sospetto la nostra posizione nell'Universo: tutte le altre galassie starebbero infatti fuggendo disperatamente dal posto che a noi è toccato di occupare! Dopo che gli scienziati nel corso dei secoli hanno allontanato progressivamente la Terra dal centro dell'Universo, la legge di Hubble sembrerebbe costringerci di nuovo a collocare la nostra Galassia in una posizione speciale, nel bel mezzo di un misterioso moto di fuga che coinvolge l'intero contenuto del Cosmo.

In realtà, è possibile interpretare l'osservazione della fuga delle galassie in maniera molto diversa. Per capirlo, iniziamo con un semplice esperimento. Prendete un elastico molto lungo e fategli una serie di nodi a distanze regolari, per esempio 1 cm. Adesso stirate l'elastico, fino a che la sua lunghezza raddoppi: i nodi saranno tutti a una distanza di 2 cm fra loro. Bene: ora, guardate di nuovo la cosa dal punto di vista di uno qualunque dei nodi. I nodi a lui più vicini, che inizialmente si trovavano a una distanza di 1 cm, saranno adesso a una distanza di 2 cm; quelli immediatamente successivi saranno passati da una distanza di 2 cm a una di 4 cm, e così via. In altre parole, dal punto di vista di uno qualsiasi dei nodi, sembrerà che tutti gli altri nodi si siano allontanati, e i più lontani in misura maggiore dei più vicini. Se l'elastico viene stirato con una velocità costante, i nodi via via più lontani sembreranno allontanarsi a velocità doppia, quadrupla, ecc. Se ogni nodo potesse parlare, penserebbe di trovarsi al centro esatto della fuga di tutti gli altri nodi, e finirebbe col chiedersi: "Che cosa ho che non va?"

Nell'Universo, le galassie non sono allineate come i nodi su un elastico, ma sono sparse in tutte le tre dimensioni dello spazio. Con un po' di fantasia, però, è possibile immaginare una situazione che assomigli di più a quella delle galassie. Per esempio, si può pensare a cosa accade agli acini di uvetta nella pasta di un panettone in lievitazione (figura 1.2). Mentre la pasta si espande, il moto degli acini, e il modo in cui varia la distan-

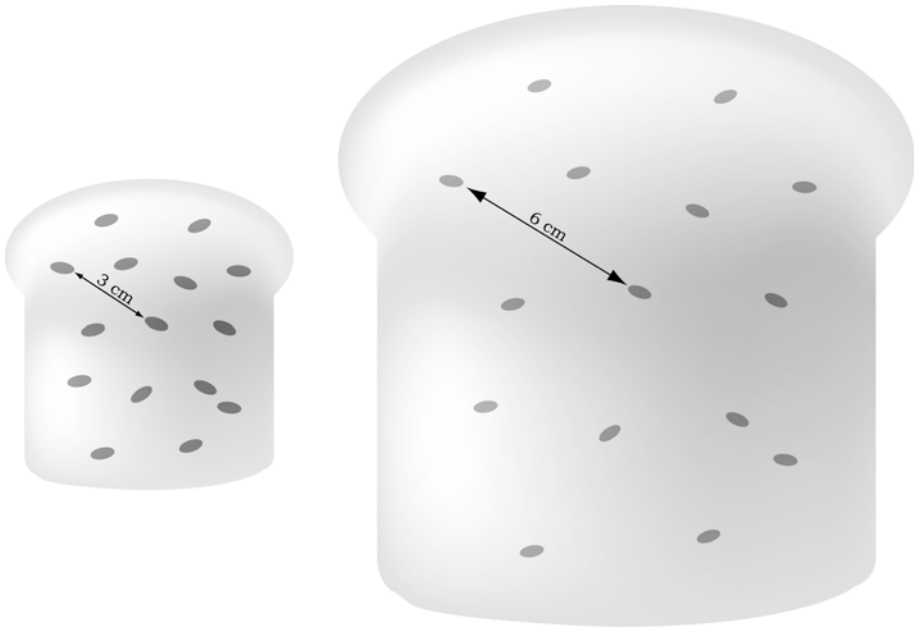



Figura 1.2: La distanza tra le galassie nell'Universo in espansione varia in modo analogo a quella tra le uvette all'interno di un panettone in lievitazione. Man mano che la pasta si espande, le uvette vengono trascinate a separazioni crescenti, e il tasso di espansione è lo stesso in ogni punto.

za tra due acini qualsiasi, è del tutto analogo a quello dei nodi dell'elastico, solo che avviene nelle tre dimensioni dello spazio. In questo senso, il panettone è un modello che meglio descrive quello che accade realmente con le galassie.

Alla fine, comunque, il risultato di questi esercizi mentali dovrebbe essere quello di convincervi che il modo più sensato di interpretare la fuga delle galassie è quello di attribuire il movimento non alle singole galassie, ma allo spazio che le contiene. In altri termini, secondo questa interpretazione, l'Universo stesso si sta espandendo. In ogni momento, la distanza tra due qualunque punti nel Cosmo aumenta inesorabilmente. Le galassie sono in realtà ferme nella loro posizione nello spazio, mentre è lo spazio stesso, "crescendo", che le allontana una dall'altra, proprio come l'elastico, estendendosi, fa muovere i nodi, o la pasta, lievitando, trascina con sé l'uvetta. Questo modo di vedere le

cose fa sì che non esistano posizioni speciali che possano essere considerate il centro dell'espansione: tutto lo spazio si sta espandendo ovunque esattamente nella stessa identica maniera.

Sarà bene a questo punto sgombrare subito il campo da un possibile equivoco: la legge di Hubble vale soltanto per distanze molto grandi, confrontabili con le dimensioni dell'intero Universo. Non si possono osservare gli effetti dell'espansione dell'Universo sulla nostra galassia, sul Sistema Solare, o sulla nostra altezza. Le dimensioni degli oggetti compatti, tenuti insieme da una forte attrazione gravitazionale, non vengono modificate dall'espansione. Le galassie, ad esempio, mantengono invariata la loro struttura. Di fatto, sebbene possa sembrare difficile da immaginare, le singole galassie sono talmente piccole in confronto all'intero Universo da potere essere considerate a tutti gli effetti come punti privi di dimensione, trascinati dall'espansione complessiva come trucioli su un fiume.

La scoperta della legge di Hubble spinse quindi a mettere in discussione l'idea di Universo statico e immutabile che aveva dominato le concezioni degli studiosi per centinaia di anni. Inoltre, per evitare di considerare la Via Lattea al centro della fuga delle galassie, costrinse a fare i conti con l'idea di uno spazio "elastico", che si espandeva trascinando con sé il contenuto dell'Universo. Che cosa poteva significare tutto questo?

A ben vedere, la legge di Hubble portava con sé anche una conseguenza ancora più profonda, di cui non è difficile rendersi conto. Dal momento che la distanza fra le galassie aumenta con il passare del tempo, esse in passato devono essere state più vicine e, anzi, a patto di risalire abbastanza indietro nel tempo, ci deve essere stato un istante nel quale tutte le distanze reciproche si annullarono. La legge scoperta da Hubble sembrava quindi implicare che l'espansione dell'Universo avesse avuto origine in un momento ben preciso, separato dal momento attuale da un intervallo di tempo finito. Questo fatto conteneva in sé il germe del modello del Big Bang.

Hubble però si guardò bene dall'attribuire un qualsiasi significato cosmologico alla sua scoperta. Era un astronomo puro, interessato a tirare fuori le osservazioni più accurate possibili usando gli strumenti migliori a sua disposizione. L'articolo che annunciava quella che passò alla storia come una delle più gran-

di scoperte di tutti i tempi, si intitolava semplicemente: "Relazione tra distanza e velocità radiale delle nebulose extragalattiche". Sarebbero stati altri a scavare nei significati più reconditi delle conquiste di Hubble e a portare le teorie cosmologiche verso l'inizio di una nuova era.

## Gravità estrema

Nei primi anni del XX secolo, un oscuro impiegato di terzo livello dell'ufficio brevetti di Berna, di nome Albert Einstein, rivoluzionò completamente il pensiero scientifico moderno, ridefinendo concetti che ci sembrano ovvi, come quelli di spazio e tempo, in un modo che finì per allontanarli radicalmente e definitivamente dal senso comune. Sarebbe impossibile tentare di affrontare in senso scientifico le domande poste dalla moderna cosmologia senza le scoperte di Einstein. Se le osservazioni di Hubble fornirono per la prima volta agli studiosi gli elementi per un'indagine diretta del Cosmo e mostrarono che l'Universo era più vasto e più strano di quello che si era sempre immaginato, furono le idee di Einstein a permettere l'interpretazione di queste osservazioni all'interno di un quadro coerente, e a rendere concepibile l'impresa di investigare il comportamento dell'Universo nella sua interezza, come un tutto organico, piuttosto che come il risultato della somma dei movimenti dei corpi celesti. Esporre in dettaglio le teorie di Einstein richiederebbe un libro a parte: cerchiamo perciò di sintetizzarne i punti che sono essenziali per comprendere la moderna visione del Cosmo.

La prima rivoluzione di Einstein, portata a termine nel 1905 a soli ventisei anni, prende il nome di *teoria della relatività speciale* (o *ristretta*). Questa teoria si basa essenzialmente su due capisaldi. Il primo, il cosiddetto *principio di relatività*, è il fatto che le leggi fisiche devono essere esattamente le stesse per qualunque osservatore, indipendentemente dal fatto che egli sia fermo o si trovi in moto in linea retta a velocità costante. Contrariamente alla volgarizzazione che spesso se ne fa, la teoria della relatività non afferma dunque che "tutto è relativo", ma che le leggi fisiche sono uniche, e che diversi osservatori devono poter disporre di una ricetta sicura che permetta loro di interpretare le

differenze dovute allo stato di moto in cui si trovano. Una ricetta di questo tipo, che i fisici chiamano *legge di trasformazione*, era in realtà già ben nota dal XVII secolo, essendo stata formulata per la prima volta da Galileo Galilei. Tuttavia, Einstein poté usare un secondo ingrediente, che Galileo non poteva conoscere e che costituisce il secondo caposaldo della sua teoria.

Questo ingrediente, scoperto solo alla fine del XIX secolo, è il fatto che la luce si propaga (nel vuoto) con una velocità ben precisa e sempre uguale, pari a circa 300 mila chilometri al secondo. Normalmente, siamo abituati a stabilire la velocità di movimento di un oggetto soltanto in relazione alla nostra stessa velocità: ad esempio, un treno ci sembrerà muoversi se siamo fermi alla stazione, ma ci sembrerà immobile se lo affianchiamo a bordo di un'auto in corsa alla stessa velocità. Nulla di tutto questo accade con la luce. Ogni osservatore, indipendentemente dal suo stato di moto, vedrà invariabilmente viaggiare la luce alla stessa velocità. Non riusciremmo a vedere "fermarsi" la luce neanche se ipoteticamente potessimo muoverci nella sua stessa direzione alla sua stessa velocità, come invece ci accade inseguendo un veicolo in movimento. Inoltre, il valore della velocità della luce costituisce il limite invalicabile per la velocità di qualunque osservatore.

Il fatto che la luce abbia una velocità finita è, di per sé, molto importante per i cosmologi: come abbiamo detto, permette loro di avere accesso a immagini dell'Universo in fasi diverse della sua evoluzione semplicemente osservando abbastanza lontano. Ma, come Einstein dovette constatare con suo grande sgomento, il fatto che la velocità della luce sia costante per tutti gli osservatori ha implicazioni molto più profonde. La velocità viene determinata attraverso la misura dello spazio percorso in un certo intervallo di tempo. D'altra parte, ogni osservatore, indipendentemente dal suo stato di moto, deve misurare sempre esattamente la stessa velocità della luce. Perché ciò sia possibile, allora, i concetti di spazio e di tempo devono diventare flessibili, perdere la loro natura immutabile, arrivando persino a sfumare l'uno nell'altro. Nella teoria della relatività speciale, la condizione di moto di diversi osservatori finisce per determinare una discordanza nelle loro misure di spazio e tempo: i righelli si accorciano o si allungano, e gli orologi non segnano il

tempo nello stesso modo. In realtà, queste discordanze vengono riconciliate introducendo l'idea che lo spazio e il tempo non esistono separatamente come grandezze assolute, ma sono solo manifestazioni parziali di un'unica entità, essa sì ben definita: lo *spaziotempo*.

La teoria della relatività speciale sconvolse le certezze dei contemporanei di Einstein. Il matematico Hermann Minkowski, che era stato docente di Einstein, espresse per primo il nuovo punto di vista nel 1908: "D'ora in poi, il tempo e lo spazio non saranno che pallide ombre: soltanto una loro unione manterrà la sua indipendenza".

Non pago di aver sconvolto una visione del mondo ritenuta certissima per millenni, nel 1915, al termine di otto anni di studi che lo portarono più volte sull'orlo dell'esaurimento nervoso ("Devi aiutarmi, altrimenti impazzirò", scrisse al collega Marcel Grossmann), Einstein diede alla luce il suo capolavoro, la sua Nona Sinfonia: la *teoria della relatività generale*. Si tratta di una delle più alte creazioni dell'intelletto umano, una teoria di grande eleganza formale che si è rivelata in grado di prevedere e interpretare correttamente un'enorme quantità di osservazioni. Il mutamento portato alla concezione del mondo dalla nuova teoria di Einstein fu talmente grande che egli stesso ebbe a dire che, se paragonata alla relatività generale, quella speciale era un gioco da ragazzi.

La teoria della relatività generale fu formulata con lo scopo di permettere l'interpretazione dei fenomeni fisici da parte di qualunque osservatore, senza restrizioni sul suo tipo di moto (nella relatività speciale, venivano considerati solo osservatori in moto a velocità costante lungo traiettorie rettilinee). Quando fu completata, essa si rivelò però anche una nuova teoria della gravitazione. Abbiamo tutti una certa familiarità con la forza di gravità, in quanto è la forza della quale facciamo esperienza nel modo più diretto nella vita di tutti i giorni. Ci mantiene ancorati a terra, guida il moto dei palloni e dei proiettili, la caduta dei gravi e le orbite dei corpi celesti. Prima dell'irruzione di Einstein sulla scena, i fenomeni dovuti alla forza di gravità erano interpretati per mezzo della *legge di gravitazione universale*, formulata dal genio di Isaac Newton alla fine del XVII secolo. Newton era riuscito a spiegare e a unificare fenomeni fino ad allora ritenuti completa-

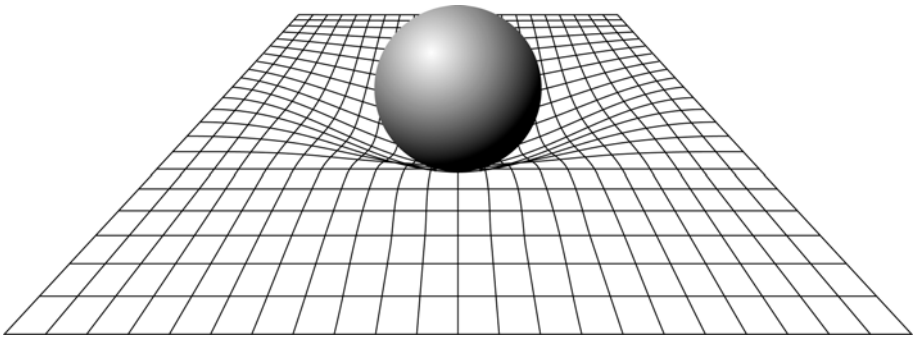


Figura 1.3: Secondo la teoria della relatività generale, lo spaziotempo viene curvato dalla presenza di massa, proprio come un telo elastico si deforma per sostenere un peso.

mente scollegati, come la caduta della celebre mela e le orbite dei pianeti del Sistema Solare. La teoria di Einstein estende e migliora la teoria di Newton, permettendo di spiegare fenomeni estremi per i quali essa si rivela inadeguata.

Per la teoria di Newton, la gravità è una forma di interazione a distanza tra i corpi. Ogni corpo è dotato di una massa, che descrive la sua capacità di interagire per mezzo della forza di gravità. Due corpi si attraggono con una forza proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa. Newton, però, non era stato in grado di spiegare la natura fisica dell'interazione a distanza tra i corpi, limitandosi ad accettarla come un fatto puramente empirico. La teoria della relatività generale di Einstein chiarisce questo punto rimasto oscuro per secoli. Secondo Einstein, la presenza di una massa modifica la struttura stessa dello spaziotempo, portando alle estreme conseguenze quella flessibilità già introdotta dalla relatività speciale. Lo spaziotempo subisce una *curvatura* per effetto della materia in esso contenuta. Pensate allo spazio vuoto come a un grosso telo elastico, tenuto teso alle estremità in modo da essere perfettamente piatto. In questa analogia, le quattro dimensioni dello spaziotempo, tre spaziali e una temporale, sono rimpiazzate da due sole dimensioni spaziali per facilitare la visualizzazione. Ora, immaginate di poggiare sul telo una grossa massa (per esempio una palla da *bowling*): il telo si incurverà, formando una cavità nel punto in cui avete adagia-

to la massa (figura 1.3). Se adesso poggiate una massa molto più piccola e leggera (per esempio una pallina da ping-pong) a una certa distanza dalla prima massa, essa rotolerà verso la cavità, venendo apparentemente "attratta" dalla massa più grande. L'attrazione gravitazionale tra due corpi non è quindi altro che una conseguenza della curvatura dello spaziotempo.

Nella teoria della gravitazione di Einstein, lo spaziotempo è un'entità dinamica, mutevole, che risente della presenza della materia. A sua volta, la materia avverte l'effetto della curvatura dello spaziotempo. Materia e spaziotempo sono quindi indissolubilmente legati. La gravità è semplicemente una manifestazione delle proprietà geometriche dello spaziotempo. Per usare le parole del fisico John Wheeler: "La materia dice allo spaziotempo come curvarsi, lo spaziotempo dice alla materia come muoversi".

Completata la teoria della relatività generale, i tempi erano maturi per affrontare l'ambizioso compito di descrivere il modo in cui la gravità plasma la struttura dell'intero Universo, investigando il comportamento dello spaziotempo non intorno alle singole masse di stelle isolate, ma sulle distanze più grandi immaginabili. Nel 1917, Einstein pubblicò l'articolo scientifico che può essere a buon diritto considerato il primo tentativo di proporre un modello di Universo scientificamente fondato: "Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività generale".

Essendo interessato al comportamento complessivo dell'Universo, Einstein poteva disinteressarsi dei dettagli locali della distribuzione di materia, e mise perciò alla base del suo modello cosmologico un'assunzione molto semplice, nota con il nome di *principio cosmologico*: l'Universo deve apparire più o meno lo stesso in qualunque direzione lo si guardi. Certo, nelle nostre vicinanze potrà accadere di vedere più materia guardando in una certa direzione piuttosto che in un'altra; ma in media, su distanze abbastanza grandi, la materia deve essere distribuita uniformemente. Non solo: qualunque punto nell'Universo deve essere un punto assolutamente equivalente a qualsiasi altro. Non esistono posti speciali nell'Universo (così come, abbiamo visto, non esiste un centro di fuga delle galassie). In gergo tecnico, si dice che l'Universo deve essere *omogeneo* (cioè in media uguale in qualunque punto lo si osservi) e *isotropo* (cioè in media uguale

in qualunque direzione lo si osservi).

Il principio cosmologico e la teoria della relatività generale di Einstein sono i due presupposti teorici su cui si fonda il moderno modello del Big Bang. Basandosi su questi due punti di partenza è infatti possibile costruire un modello di Universo in espansione che spiega perfettamente l'osservazione della fuga delle galassie effettuata da Hubble. Per un paradosso della storia, dopo aver profondamente cambiato la visione dell'Universo con le sue scoperte, e aver posto le basi per affrontare il problema cosmologico con l'articolo del 1917, Einstein non si accorse che era possibile ricavare dalle sue equazioni una soluzione che permette di descrivere un Universo in espansione. In questo, si rivelò stranamente conservatore: egli, infatti, cercava di costruire un modello di Universo che fosse statico ed eterno, sempre uguale a se stesso, senza un inizio né una fine. Un pregiudizio filosofico che regnava nelle concezioni degli scienziati dell'epoca e che Einstein sposava in pieno, ma che finì per influenzare il suo modello cosmologico. L'ostinazione di Einstein nel cercare una soluzione statica alle sue equazioni, peraltro, lo spinse a compiere un gesto che lasciò profonde ripercussioni nello sviluppo della fisica e della cosmologia moderna. Ritorneremo su questo punto in seguito, nel capitolo 5.

Alla fine, fu un giovane matematico russo, Alexander Friedmann, a dimostrare per primo, nel 1922, che la teoria di Einstein, assieme all'ipotesi di uniformità della distribuzione di materia, ammetteva la possibilità di un Universo in espansione. È notevole il fatto che Friedmann arrivò a questa soluzione alcuni anni prima della scoperta della fuga delle galassie da parte di Hubble. Il modello di Friedmann dovette vincere enormi resistenze prima di essere accettato. Lo stesso Einstein si dimostrò ostile nei confronti delle idee del giovane collega, e inizialmente sostenne che i calcoli alla base del modello erano errati. In seguito, ammise che non c'erano errori e che le soluzioni erano corrette, pur continuando a sostenere che esse non avevano alcuna attinenza con l'Universo reale. Fu proprio la scoperta di Hubble a convincere la comunità scientifica, incluso il recalcitrante Einstein, che era possibile che l'Universo non fosse statico, ma si stesse evolvendo. Il povero Friedmann, purtroppo, morì di tifo nel 1925, e non poté mai godere del tardivo successo

del suo modello.

Il lavoro di Friedmann costituisce ancora oggi l'ossatura del modello del Big Bang. In particolare, applicando l'idea fondamentale della teoria della relatività generale, ovvero che le proprietà dello spaziotempo sono legate alla distribuzione di materia, esso metteva in relazione in modo elegante l'espansione dell'Universo e il suo contenuto materiale, e permetteva di evitare la paradossale conclusione che la Via Lattea fosse al centro della fuga delle galassie. Vediamo come.

## Il peso di tutte le cose

Quando provate a lanciare un sasso verso l'alto (all'aperto, ovviamente), non siete affatto sorpresi nell'osservare che, percorsi alcuni metri, esso si ferma, inverte il suo moto e ricade miseramente a terra. Sapete perfettamente che la forza di gravità tiene il sasso legato alla Terra, e voi non siete abbastanza forti da dare al sasso l'energia necessaria a rompere questo legame. Se però foste Superman, riuscireste agevolmente a imprimere al sasso una velocità tale da fargli vincere l'attrazione gravitazionale della Terra e allontanarsi nello spazio senza più fermarsi. C'è in realtà una terza possibilità: Superman, con l'incredibile abilità che contraddistingue i supereroi, potrebbe dare al sasso esattamente la velocità necessaria a compensare il legame gravitazionale, né un po' di più, né un po' di meno. Questo valore particolare della velocità si chiama *velocità di fuga*. In questo caso, il sasso adotterà un comportamento limite: finirà per fermarsi, ma solo dopo che sarà trascorso un tempo infinito[2].

Quanto abbiamo appena esposto può essere usato come un'analogia per capire i possibili modi in cui può espandersi l'Universo secondo il modello del Big Bang. Questi modi, così come furono catalogati da Friedmann, sono infatti soltanto tre:

1. l'Universo non si espande per sempre, ma a un certo punto si ferma e comincia a contrarsi;

[2]Non serve Superman per calcolare il valore della velocità di fuga dalla superficie della Terra: essa è pari a circa 11 chilometri al secondo, ovvero oltre 40 mila chilometri all'ora. Questa è la velocità minima che deve avere un oggetto per abbandonare il nostro pianeta.

2. l'Universo si espande per sempre;

3. l'Universo arresta la sua espansione dopo un tempo infinito.

Esattamente come il sasso lanciato in aria può adottare soltanto uno dei tre comportamenti possibili, così i tre modi di espansione dell'Universo si escludono a vicenda: il nostro Universo può appartenere a una soltanto delle tre categorie[3].

In realtà, la nostra analogia sarebbe un po' più accurata se immaginassimo di poter dare al nostro sasso soltanto una velocità ben precisa. Siccome Superman è molto occupato a salvare il mondo, ha deciso di costruirci una catapulta, tarata in modo tale da lanciare il sasso sempre esattamente alla velocità di fuga dalla Terra. Fintanto che restiamo sul nostro pianeta, quindi, il comportamento del sasso sarà sempre lo stesso: dopo il lancio, esso continuerà ad allontarsi, e dovremo attendere un tempo infinito perché freni completamente. Se però spostassimo la nostra catapulta sulla Luna, che ha una massa più piccola della Terra, il legame gravitazionale esercitato sul sasso sarebbe più debole, ed esso potrebbe perdersi indisturbato nello spazio. Al contrario, trasportare il nostro congegno su un pianeta molto più massiccio della Terra, come Giove, lo renderebbe completamente inutile: il sasso non riuscirebbe a separarsi dall'influsso gravitazionale del pianeta, e in breve tempo finirebbe per fermarsi e invertire il suo moto.

Per il nostro Universo in espansione, le cose vanno in maniera molto simile. Qualsiasi porzione di materia contenuta al suo interno esercita infatti un'influenza gravitazionale su tutto il resto della materia. L'intero contenuto materiale dell'Universo è tenuto in contatto dalla forza di gravità: l'espansione risente quindi dell'influenza complessiva di tutta la materia contenuta nell'Universo. Quello che succede è allora facilmente intuibile: se nell'Universo c'è abbastanza materia, l'effetto complessivo della sua attrazione gravitazionale sarà quello di portare l'espansione a rallentare fino a fermarsi, esattamente come l'attrazione di Giove costringe il sasso tarato sulla velocità di fuga della Ter-

[3] I lettori più esperti potrebbero sapere che esiste in realtà un quarto comportamento possibile, del quale ci occuperemo in seguito.

ra a tornare indietro. In caso contrario, se la massa complessiva non è sufficiente, niente riuscirà ad arrestare l'espansione, ed essa continuerà per sempre. Stabilire quale dei tre comportamenti catalogati da Friedmann è quello che corrisponde alla realtà equivale perciò a stabilire quanta massa è contenuta nel Cosmo: in altre parole, dobbiamo "pesare" l'Universo!

In realtà, i cosmologi preferiscono misurare la quantità di materia contenuta nell'Universo in termini della sua *densità*, cioè la massa divisa per il volume occupato. Se la densità media dell'Universo è pari esattamente a un certo valore, chiamato *densità critica*, esso si comporterà secondo la terza tra le possibilità esposte sopra, ovvero arresterà la sua espansione, ma solo dopo che sarà trascorso un tempo infinito. Se invece la densità dell'Universo è maggiore della densità critica, avremo il primo comportamento, cioè l'Universo invertirà un giorno la sua espansione e finirà per ricollassare su se stesso. Al contrario, se la densità è minore della densità critica, l'Universo continuerà a espandersi per sempre (figura 1.4).

Ovviamente, il valore esatto della densità critica dipende dalla velocità di espansione dell'Universo. È chiaro infatti che se l'Universo si espande più velocemente servirà più materia per poter fermare l'espansione (così come se il sasso è lanciato a velocità più grande servirà un pianeta più massiccio per farlo tornare indietro). La velocità con cui l'Universo si sta attualmente espandendo viene misurata in termini di una quantità che prende il nome proprio dallo scopritore dell'espansione: si chiama infatti *costante di Hubble* e si indica con il simbolo $H_0$. Il parametro con cui viene misurata la densità dell'Universo in rapporto alla densità critica, si indica con la lettera greca omega, $\Omega$. Il valore $\Omega$=1 significa che l'Universo ha esattamente una densità pari a quella critica. Valori di $\Omega$ maggiori di 1 indicano una densità maggiore della densità critica, valori di $\Omega$ minori di 1 una densità minore.

Non dobbiamo pensare che la densità critica sia un valore enorme. Al contrario, essa vale circa $10^{-29}$ grammi per centimetro cubo, ovvero è pressappoco cento miliardi di miliardi di miliardi di volte più piccola della densità dell'acqua (che, come sappiamo, è di 1 grammo per centimetro cubo). Per immaginare una densità così piccola, dovete pensare di mettere soltanto

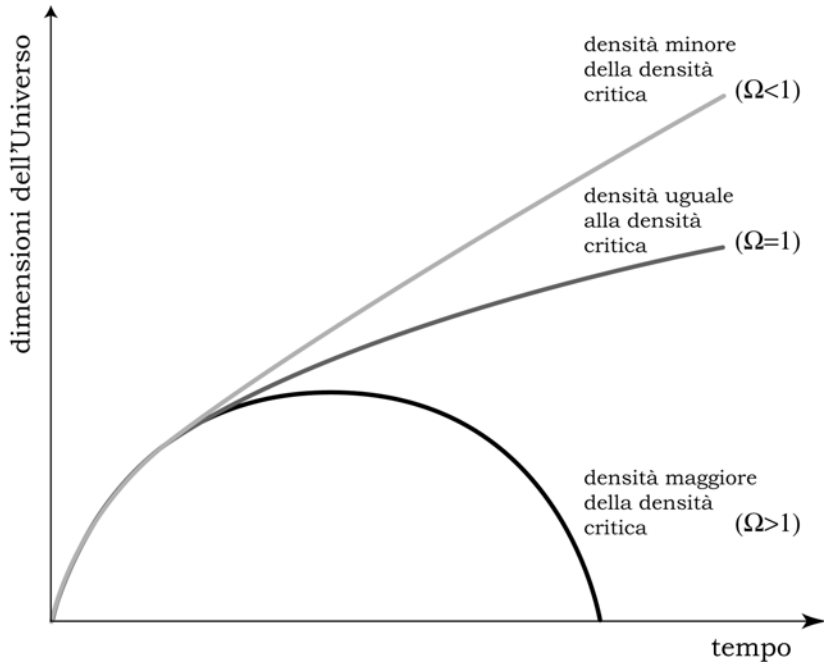



Figura 1.4: Il modo in cui si espande l'Universo dipende dalla sua densità media: se essa supera un certo valore critico l'Universo ricollassa, altrimenti si espande indefinitamente.

sei atomi di idrogeno in una scatola cubica di un metro di lato, oppure un grammo di materia in un volume cento volte maggiore di quello della Terra. Per confronto, nell'aria che respiriamo, e che ci sembra così poco densa, ci sono ben $10^{25}$ (1 seguito da 25 zeri) atomi per metro cubo. Se nella nostra esperienza quotidiana siamo abituati ad avere a che fare con densità molto maggiori di quella critica è soltanto perché viviamo in una zona dell'Universo molto affollata: in realtà, il Cosmo è in media un posto desolantemente vuoto. Data la vastità dell'Universo, però, anche una densità media piccolissima causa un effetto gravitazionale complessivo così grande da incidere sulle sorti ultime del Cosmo.

Siamo riusciti a intuire come il contenuto di materia influenzi le proprietà di espansione dell'Universo basandoci su un'analogia intuitiva (quella del sasso lanciato in aria) che un fisico dei tempi di Newton sarebbe sicuramente stato in grado di com-

prendere con le conoscenze a sua disposizione. Non c'è niente di strano, infatti, nel concludere che l'attrazione gravitazionale esercitata da tutta la materia contenuta nell'Universo possa in qualche modo influenzare il moto complessivo della materia stessa. Perché Friedmann aveva dovuto ricorrere alla relatività generale per formulare il suo modello di Universo in espansione?

Tanto per cominciare, nell'idea di Universo basata sulla teoria della gravitazione di Newton, lo spazio e il tempo sono entità che possiedono un carattere assoluto. Il moto della materia avviene all'interno della cornice immutabile dello spazio, e i corpi celesti sono come biglie che rotolano su un solido pavimento. Immaginare che sia lo spazio stesso a espandersi, trascinando con sé la materia, è inconcepibile in questa visione del mondo. L'esistenza di uno spazio assoluto costringerebbe però a cercare un centro per l'Universo, un punto rispetto al quale poter mettere in relazione il moto di fuga delle galassie. Si giungerebbe così all'assurda conclusione che questa posizione privilegiata nell'Universo è occupata proprio dalla Terra. Lo spaziotempo dinamico introdotto da Einstein rende invece supefluo tutto questo, ed è perfetto per inquadrare in un ambito razionale le scoperte di Hubble. Ma, come stiamo per vedere, la teoria di Einstein svela legami ancora più sorprendenti tra le proprietà complessive dell'Universo e il suo contenuto, legami che nessun fisico del XIX secolo sarebbe stato lontanamente in grado di sospettare.

## Questione di forma

Einstein aveva riformato l'idea innata di spazio e di tempo, rendendoli dapprima due concetti inestricabilmente legati e portati a sfumare l'uno nell'altro, e successivamente alterandone la rigidità, introducendo il concetto che la materia potesse curvarne e deformarne la struttura. Nei suoi studi, egli aveva potuto fare tesoro delle idee del matematico Georg Riemann, che alla fine del XIX secolo aveva introdotto un formalismo che rendeva possibile trattare i problemi geometrici su qualsiasi tipo di superficie. Tutti noi abbiamo studiato da bambini i teoremi della *geometria euclidea*, che ha il suo campo di validità nel tranquillo mondo dei fogli di carta o delle lavagne, ossia sulle superfici perfettamen-

te piane. In questo territorio familiare, due rette parallele non si incontrano mai, la somma degli angoli interni di un triangolo dà 180 gradi, la circonferenza di un cerchio è pari al suo raggio moltiplicato per $2\pi$, e così via.

Ma, se invece che su un foglio di carta, tentassimo di riprodurre questi risultati sul telo elastico curvato dal peso della palla da *bowling* del nostro esempio di qualche pagina fa, le cose si farebbero molto complesse, e troveremmo delle sorprese. Per esempio, le relazioni tra le distanze dei diversi punti del telo cambierebbero in maniera complicata, a seconda della deformazione a cui esso è soggetto. Una qualunque forma geometrica disegnata sul telo verrebbe alterata in modo da perdere le caratteristiche che ci sono familiari quando è invece tracciata su un foglio di carta. Ci accorgeremmo rapidamente, ad esempio, che su una superficie curva la somma degli angoli interni di un triangolo non dà sempre 180 gradi. Riemann fornì al mondo gli strumenti matematici per affrontare proprio questo tipo di problemi. Einstein si spinse oltre: affermò che è il mondo stesso, lo spaziotempo in cui viviamo, a non essere simile a un foglio di carta, ma a possedere le stesse bizzarre caratteristiche di un telo elastico piegato, curvato, distorto, stirato, disseminato di avvallamenti e dossi. Non solo, ma per Einstein queste alterazioni della struttura dello spaziotempo sono presenti ovunque ci sia materia, e sono responsabili delle interazioni gravitazionali tra i corpi.

Le proprietà geometriche dello spaziotempo vengono modificate dalla materia presente in esso. Questa è l'idea chiave della teoria della relatività generale di Einstein e, di conseguenza, deve fare in qualche modo parte di qualsiasi modello cosmologico scientificamente fondato. In effetti, quando parliamo dell'Universo ci stiamo riferendo a tutta la materia e a tutto lo spaziotempo. Quindi, dovremmo poter riformulare la frase precedente dicendo che le proprietà geometriche dell'Universo vengono modificate dalla materia presente in esso. Ma che cosa vogliamo dire esattamente quando parliamo di "proprietà geometriche dell'Universo"?

Immaginiamo di svuotare l'Universo di tutto il suo contenuto: atomi, molecole, pianeti, stelle, galassie. In assenza totale di materia, la relatività generale ci porta a immaginare uno spa-

ziotempo completamente privo di qualsiasi increspatura, perfettamente uguale a se stesso in ogni suo punto. Lo spazio rassomiglierà a quello statico e assoluto di Newton: se avesse solo due dimensioni sarebbe un foglio liscio e rigido su cui potremmo immaginare di disegnare dei quadretti per specificare un sistema di coordinate e sul quale varrebbero i consueti teoremi della geometria euclidea. Ora, stabilire quali sono le proprietà geometriche dell'Universo equivale a chiedersi: come si modifica questo sistema di coordinate quando reintroduciamo di nuovo tutta la materia? Come si incurva lo spaziotempo? Nell'analogia della palla da *bowling* e del telo, che esemplificava il modo in cui si modifica lo spazio intorno a un oggetto sferico come una stella, la risposta sembrava semplice: il sistema di coordinate si incurva e si stira in corrispondenza della palla. Ma l'Universo contiene tantissima materia, distribuita in modi complicati, e l'impresa di calcolare la modificazione del sistema di coordinate sembrerebbe disperata.

In realtà, ci vengono in aiuto alcune considerazioni. Prima di tutto, stiamo tentando di stabilire le proprietà geometriche dell'Universo nel suo complesso, non i dettagli di come lo spaziotempo si incurva in corrispondenza di regioni specifiche. Localmente, la curvatura dello spaziotempo può in effetti variare in maniera molto complicata: ma su scale abbastanza grandi, paragonabili alle dimensioni dell'intero Universo, queste variazioni saranno ininfluenti, e conterà soltanto l'effetto totale di tutta la materia. Inoltre, abbiamo affermato la validità del principio cosmologico, per cui sappiamo che in media la materia deve essere distribuita in maniera pressoché uniforme in tutto l'Universo. Visto in questi termini, il problema si semplifica notevolmente. Infatti, nell'ambito della relatività generale, si dimostra che un Universo omogeneo e isotropo (cioè in cui vale il principio cosmologico) può avere solo tre tipi possibili di geometria. Prima di illustrarli, però, dobbiamo fare una piccola pausa.

Abbiamo detto che lo spaziotempo è caratterizzato da quattro dimensioni: le tre spaziali (cui ci riferiamo solitamente come lunghezza, larghezza e altezza) e quella temporale. Sebbene la presenza di materia incurvi tutte e quattro le dimensioni dello spaziotempo, nel seguito ci occuperemo soltanto dell'effetto sulla curvatura delle tre dimensioni spaziali dell'Universo. Inol-

tre, dal momento che nessuno di noi riesce a visualizzare uno spazio tridimensionale che si curva (perché per farlo dovremmo immaginare di "piegarlo" attraverso una quarta dimensione, di cui non abbiamo esperienza), continueremo a usare analogie in cui lo spazio ha solo due dimensioni (come nel caso del telo elastico).

Fatte queste premesse, ecco quali sono i possibili tipi di curvatura spaziale dell'Universo (figura 1.5):

1. l'Universo può avere una curvatura *positiva*: per capire di cosa si tratta, usando un'immagine bidimensionale, dobbiamo visualizzare la superficie di una sfera;

2. l'Universo può avere una curvatura *negativa*: in questo caso, l'immagine bidimensionale da visualizzare è un po' strana, ma somiglia alla superficie di una sella;

3. infine, l'Universo può non avere affatto curvatura: in questo caso, la sua geometria, in termini bidimensionali, è equivalente a quella di una superficie perfettamente piana.

Un Universo del primo tipo, a curvatura positiva, non ha nessun confine naturale, pur mantenendo un'estensione finita. Al solito, l'analogia con la superficie bidimensionale corrispondente, la sfera, può essere d'aiuto a comprendere questa caratteristica: se fossimo esseri bidimensionali, la nostra esistenza sarebbe limitata alla sola superficie della sfera, che sarebbe tutto il nostro "Universo". Muovendoci in questo Cosmo bidimensionale a curvatura positiva, non incontreremmo mai nessun cartello con la scritta: "Qui termina l'Universo". Se avessimo abbastanza tempo potremmo persino continuare a camminare in linea retta e ritornare un giorno al punto da cui siamo partiti, proprio come i protagonisti de "Il giro del mondo in 80 giorni". Gli Universi a curvatura positiva si chiamano anche *chiusi*. Gli altri due tipi di Universo, invece, possono almeno teoricamente essere entrambi infiniti. Anche questi Universi non hanno confini naturali, ma se continuassimo a camminare abbastanza a lungo incontreremmo sempre nuove regioni inesplorate. Gli Universi a curvatura negativa si chiamano anche *aperti*. Gli Universi a curvatura nulla sono semplicemente *piatti*.

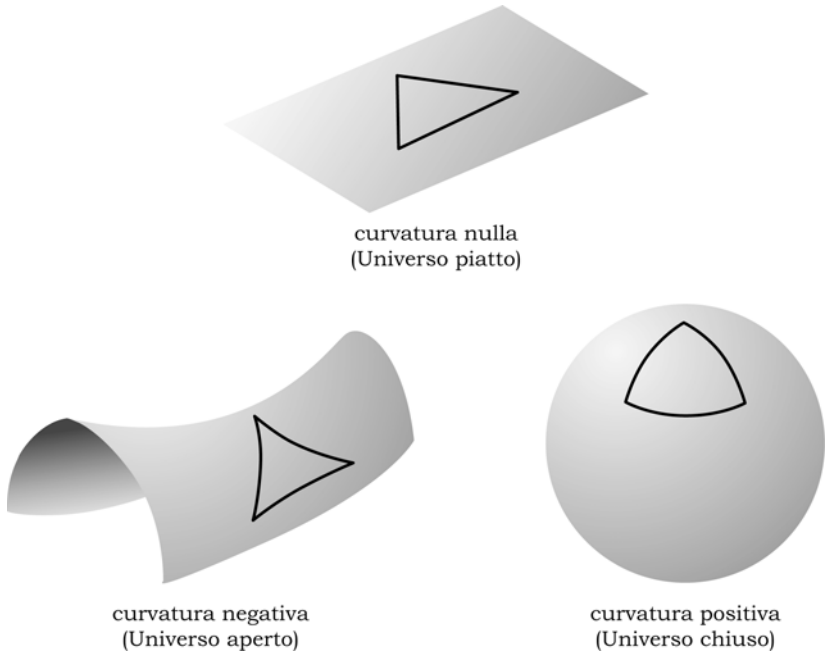



Figura 1.5: I tre possibili tipi di geometria dell'Universo possono essere visualizzati come superfici bidimensionali: un piano (Universo piatto, con curvatura nulla), una sella (Universo aperto, con curvatura negativa) o una sfera (Universo chiuso, con curvatura positiva). La somma degli angoli interni di un triangolo disegnato su ciascuna superficie è, rispettivamente, uguale a 180°, minore di 180° e maggiore di 180°.

L'idea di un Universo piatto è quella a cui siamo più abituati: un Universo piatto è quello in cui intuitivamente ci sembra di vivere, ed è quello in cui vale la geometria euclidea che ci insegnano a scuola. In effetti, su distanze piccole come quelle accessibili alla nostra esperienza, qualsiasi Universo deve sembrare abbastanza piatto, così come la Terra ci sembra abbastanza piatta nei nostri dintorni, anche se sappiamo che in realtà non lo è. Per accorgersi dell'eventuale curvatura dell'Universo bisogna fare osservazioni su regioni di spazio molto grandi, comparabili alla dimensione dell'intero Universo: come, nel caso di un Universo chiuso, inviare un segnale luminoso potentissimo e vedercelo ritornare alle spalle dopo molti miliardi di anni... Ma vedremo più avanti nel corso di questo libro che esistono anche modi un

po' più ragionevoli per misurare la curvatura dell'Universo.

Possiamo adesso tornare al punto da cui siamo partiti, e cioè al fatto che la geometria dell'Universo è determinata dal suo contenuto di materia, e fare un importante collegamento con quello che abbiamo appreso in precedenza sull'espansione dell'Universo. Abbiamo visto prima che esistono tre modi possibili in cui l'Universo può espandersi; adesso sappiamo anche che esso può assumere tre possibili geometrie. Come potreste avere intuito, le due cose sono in effetti legate. Un Universo la cui densità è maggiore di quella critica sarà un Universo di tipo chiuso; sarà invece aperto se la sua densità è minore di quella critica, e infine piatto se la sua densità è esattamente uguale a quella critica. Il collegamento tra la classificazione dei diversi tipi di espansione e quella dei diversi tipi di geometria è una diretta conseguenza della teoria di Einstein. Una densità di materia sufficientemente alta non solo impedisce che l'espansione continui in eterno, ma curva a tal punto la struttura dello spazio da far richiudere su se stesso l'Universo. Al contrario, una densità di materia più bassa di quella critica rende eterna l'espansione, e infinita la struttura dello spazio.

Quanto abbiamo visto finora ci mette finalmente in condizione di chiarire una cosa che è di solito fonte di confusione in chi sente parlare per la prima volta del modello del Big Bang. L'idea che l'Universo abbia avuto origine da una specie di grande esplosione è sbagliata. Un'esplosione inizia infatti in un singolo punto dello spazio e procede espellendo materiale verso l'esterno a partire da questo centro iniziale. L'Universo, invece, non si espande intorno a un centro, e inoltre non si espande "dentro" o "verso" qualcosa, in quanto è lo spazio stesso a espandersi. Per il modello del Big Bang, l'intera struttura dello spaziotempo ha avuto origine con l'Universo: lo spazio ha iniziato a espandersi in un momento iniziale, e l'Universo coincide con tutto lo spazio. L'unico modo per immaginare correttamente la cosa, di nuovo, è usare l'analogia del mondo bidimensionale. Se pensate al modello di Universo chiuso, è abbastanza facile visualizzare l'espansione, in quanto essa somiglierà a un palloncino che si gonfia. Per esseri che vivano sulla superficie del palloncino l'espansione non ha alcun centro: tutto il loro spazio si sta espandendo esattamente nello stesso modo. Il centro della sfera non

fa parte dell'Universo degli esseri bidimensionali. Il modo migliore per rispondere alla domanda: "Dove è avvenuto il Big Bang?" è "Ovunque!".

Inoltre, prima che i più svelti si pongano la domanda, aggiungiamo che, ebbene sì, essendo tempo e spazio indissolubilmente legati, nel modello del Big Bang anche il tempo nasce con l'Universo. Purtroppo, quindi (o per fortuna?) domande sul "prima" o sul "fuori" dell'Universo non rientrano nei limiti di questo modello: esattamente come non c'è niente fuori dell'Universo, non c'è neanche niente prima del Big Bang. O, con le parole di S. Agostino: "Non c'è un allora dove non c'è il tempo".

## Per un pugno di numeri

Entro la prima metà del XX secolo, la scienza aveva prodotto per la prima volta una cornice teorica coerente e logicamente fondata in cui inquadrare le domande sulla nascita e l'evoluzione dell'Universo che l'umanità si era andata ponendo per millenni. La cosmologia poteva finalmente muovere i primi passi in un terreno sgombro da miti, speculazioni e false piste. Einstein, Hubble, Friedmann, e tutti gli altri grandi studiosi che avevano partecipato a questa impresa, stavano guidando lentamente la scienza in un mondo che fino a poco prima le era stato completamente precluso. Il mondo assumeva nuove forme e nuove idee si facevano strada.

La neonata cosmologia doveva però affrontare ancora innumerevoli problemi. Il modello del Big Bang doveva ancora dimostrare inequivocabilmente di essere una buona descrizione della realtà e, come ogni teoria scientifica valida, doveva farlo superando in modo convincente le prove osservative che gli si ponevano davanti. Ma la cosa importante era che i cosmologi avevano un modello, un'ipotesi di lavoro plausibile da poter confrontare con i fatti del mondo reale.

Una delle conseguenze di ogni nuova teoria scientifica è quella di rendere più semplice la descrizione di fenomeni che prima erano stati considerati terribilmente complessi. Ad esempio, Newton rivoluzionò le conoscenze scientifiche del suo tempo scoprendo che tanto la caduta degli oggetti sulla Terra che le orbite

dei corpi celesti dipendevano in realtà da una sola legge, la legge di gravitazione universale. Ogni nuova legge porta con sé l'introduzione di un numero in genere piccolo di quantità numeriche che servono a produrre previsioni su fatti misurabili del mondo reale. In un certo senso, l'esistenza di pochi parametri numerici per una teoria è un indice del suo grado di coerenza interno. Mostra che non si stanno aggiustando le cose *ad hoc* per produrre previsioni corrette nei casi già noti, ma che la teoria è abbastanza elegante da stare in piedi con le sue proprie forze.

Nel caso della teoria di Newton, l'unico parametro numerico è la costante di gravitazione universale, che specifica la forza caratteristica dell'attrazione gravitazionale tra due corpi. Nella teoria della relatività speciale di Einstein compare soltanto il valore numerico della velocità della luce nel vuoto. Come abbiamo cercato di mostrare nelle parti precedenti di questo capitolo, la formulazione più elementare del modello del Big Bang prevede che l'evoluzione della struttura complessiva dell'Universo su grande scala si possa interpretare in termini di due sole quantità: la velocità di espansione attuale dell'Universo, che si ricava dalla costante di Hubble $H_0$, e la densità complessiva dell'Universo misurata in termini della densità critica, che viene indicata dal parametro $\Omega$. La conoscenza di questi due numeri ci permetterebbe da sola di trarre conclusioni importantissime sulla natura dell'Universo in cui viviamo.

Se conoscessimo la costante di Hubble, ad esempio, potremmo usarla per estrapolare il comportamento dell'Universo nel passato e giungere a una stima del tempo trascorso dal momento del Big Bang. Esattamente nello stesso modo in cui, se sappiamo la velocità di un treno e la distanza percorsa dall'ultima stazione, possiamo calcolare quanto tempo fa deve aver lasciato la stazione, così, conoscendo il valore della velocità a cui si allontana una galassia posta a una certa distanza, potremmo stimare il momento in cui la galassia si trovava a una distanza nulla da noi. Inoltre, la più grandiosa conseguenza della teoria di Einstein, ovvero la connessione tra il contenuto dell'Universo, la sua forma, e il modo in cui si espande, ci mette nella condizione di poter capire in un colpo solo le proprietà geometriche dell'Universo, la natura della sua evoluzione, e il suo futuro destino, "semplicemente" misurando la densità media di tutta la

materia che esso contiene.

Tuttavia, per quanto allettanti possano sembrare i suoi frutti, la caccia a questi due numeri si è rivelata incredibilmente difficile e di fatto ha tenuto occupate generazioni di cosmologi per tutto un secolo. Determinare la costante di Hubble implica tremende difficoltà tecniche, in quanto impone di conoscere con grande precisione sia la velocità di una galassia che la sua distanza. Entrambe le misure sono estremamente ardue. La velocità di una galassia, per ragioni che saranno più chiare nel corso di questo libro, spesso non è interamente dovuta all'espansione dell'Universo, ma risente anche dell'esistenza di fenomeni locali, come l'attrazione gravitazionale di galassie vicine. Sebbene sia relativamente semplice misurare la velocità di una galassia, non è sempre possibile escludere in modo certo che questa velocità non sia causata anche da ragioni che non hanno nulla a che fare con l'espansione. Per eliminare quanto più possibile questa incertezza, i cosmologi devono osservare il moto di galassie molto lontane da noi che risentano il meno possibile di effetti gravitazionali locali.

Se quello della misura delle velocità è un problema, il compito di misurare le distanze degli oggetti celesti più lontani è in assoluto uno dei più ardui per un cosmologo osservativo. Il metodo più usato sfrutta il fatto che l'energia che riceviamo da una sorgente luminosa diminuisce, quando la si osserva da una certa distanza, in un modo che è facile calcolare: data una certa *luminosità assoluta* (cioè l'energia effettivamente emessa dalla sorgente), la *luminosità apparente* (cioè quella che vediamo da lontano) diminuisce in maniera inversamente proporzionale al quadrato della distanza. In parole povere, una lampadina distante il doppio di un'altra identica ci sembra quattro volte meno luminosa. Quindi, se sappiamo con certezza qual è la luminosità assoluta di un qualche tipo di oggetto celeste (una stella, una galassia), se cioè abbiamo quello che gli astronomi chiamano una *candela standard*, possiamo determinarne facilmente la distanza. Purtroppo le cose non sono così semplici per diverse ragioni. Un esempio può servire a capire la tecnica che usano gli astronomi per misurare la distanza di oggetti celesti sempre più lontani.

Immaginiamo di trovarci all'inizio di un lungo ponte, e di no-

tare che il lampione che si trova accanto a noi, da questo lato del ponte, sia dello stesso tipo che illumina l'altro lato del ponte. Possiamo determinare facilmente la luminosità assoluta della lampadina del lampione dal nostro lato. Siccome quella che sta dall'altro lato è identica, la misura della sua luminosità apparente ci permette di stimare la lunghezza del ponte. Ora, ci accorgiamo che accanto al lampione dall'altro lato del ponte ce n'è un altro che è di tipo diverso ed emette molta più luce. Usando un binocolo, osserviamo che lo stesso tipo di lampione sembra trovarsi nella piazza di un paese sperduto sul cocuzzolo di una lontana montagna. Siccome abbiamo osservato il nuovo tipo di lampione vicino alla fine del ponte (di cui adesso sappiamo la distanza) possiamo prima stimarne la luminosità assoluta e poi usare questa per determinare la distanza del paese.

Questo è esattamente quello che fanno gli astronomi. Costruiscono cioè una *scala di indicatori di distanze*, determinando la luminosità assoluta di sorgenti via via più potenti e più distanti sulla base di altre sorgenti di luminosità nota. Il problema di questo approccio sta nel fatto che un errore compiuto in uno qualunque dei passi intermedi si ripercuote in maniera disastrosa su tutti gli altri. Se la scala ha anche un solo gradino ballerino, essa diventa completamente inservibile. Se poi uno dei gradini manca del tutto, non possiamo usarla per salire più in alto, e siamo costretti a interrompere le nostre misure.

È istruttivo considerare come i problemi nella determinazione delle distanze afflissero anche il lavoro originario di Hubble e Humason sulla fuga delle galassie. Come abbiamo detto, Hubble sfruttò il fatto che le stelle Cefeidi scoperte da Henrietta Leavitt sono buone candele standard, e usò la scoperta di alcune Cefeidi nelle galassie da lui osservate per misurarne la distanza. Le stime di Hubble lo portarono a concludere che una galassia alla distanza di circa 3,26 milioni di anni luce dovesse allontanarsi alla incredibile velocità di 558 chilometri al secondo. Usando questa stima per determinare quando ha avuto inizio il moto delle galassie, si ottiene un valore di 1,8 miliardi di anni. Ma già ai tempi di Hubble era noto con certezza che la Terra si è formata non più tardi di 3 miliardi di anni fa (oggi sappiamo che la Terra ha circa 4,5 miliardi di anni). Il modello del Big Bang incontrava quindi il suo primo problema: l'Universo sembrava avere avuto

origine in un istante successivo alla formazione della Terra!

Fu un collega di Hubble all'Osservatorio di Mount Wilson, Walter Baade, a scoprire un difetto nelle assunzioni di Hubble. Baade si accorse che le Cefeidi usate da Hubble erano di tipo diverso da quelle per le quali era stata determinata la luminosità assoluta. Quelle di Hubble erano intrinsecamente più luminose, e davano perciò l'impressione di trovarsi più vicine di quanto fossero in realtà. Dopo aver scoperto questo fatto, Baade ricalcolò le distanze delle galassie osservate da Hubble e giunse alla conclusione che la costante di Hubble aveva un valore circa due volte più piccolo, per cui l'età dell'Universo era di circa 3,6 miliardi di anni. Questo era ancora troppo poco rispetto alle stime note delle età delle stelle, che sono di sicuro più vecchie della Terra. Tuttavia, nel corso dei decenni il valore della costante di Hubble subì ulteriori revisioni man mano che le misure delle distanze diventavano più accurate, e infine portò a stime dell'età dell'Universo più confortevoli, dell'ordine di 15 miliardi di anni. Tra gli astronomi e i cosmologi, circolò per lungo tempo la battuta che, dopo tutto, la costante di Hubble non era davvero costante, dal momento che il suo valore era diminuito progressivamente, passando dal valore stimato originariamente da Hubble a un valore dieci volte più piccolo nel giro di pochi decenni!

Problemi altrettanto grandi hanno attanagliato i cosmologi nel tentativo di determinare il contenuto complessivo dell'Universo e la sua densità media. L'inventario del Cosmo non può essere eseguito semplicemente contando il numero di galassie (un'impresa titanica, ma in linea di principio, concepibile) per il semplice motivo che nessuno può garantirci che esse esauriscano tutto il contenuto dell'Universo. Potrebbe esserci di più di quello che è visibile agli occhi! Siamo nella stessa situazione di chi, di notte, volesse farsi un'idea del numero di case che compongono un paesino arroccato su una lontana collina semplicemente contando il numero di luci accese. Non c'è una relazione precisa tra numero di luci e case: alcune case potrebbero avere molte finestre illuminate, altre solo una, altre ancora potrebbero essere completamente buie perché i proprietari sono usciti o dormono. La nostra stima sarebbe viziata in partenza, e potremmo ottenere solo una valutazione grossolana del numero di case presenti nel paese. Allo stesso modo, gli astronomi confida-

no nel fatto che debba esserci una qualche relazione tra la luce che osservano e la quantità di materia distribuita nell'Universo, ma non sono sempre certi che la relazione sia sufficientemente accurata da ottenere misure abbastanza precise. La connessione tra le proprietà geometriche dell'Universo e il suo contenuto complessivo permetterebbe di aggirare l'ostacolo e tentare la strada della determinazione della curvatura: ma anche questo è un terreno estremamente accidentato.

La determinazione accurata dei *parametri cosmologici*, ossia della manciata di numeri che caratterizzano il nostro Universo, e di cui vedremo altri esempi nei prossimi capitoli, è stata una delle attività principali della cosmologia per tutto il XX secolo. Le enormi difficoltà incontrate hanno aguzzato le menti degli studiosi, che hanno dovuto escogitare metodi sempre più ingegnosi per catturare i segreti nascosti nelle quantità numeriche che definiscono il modello del Big Bang. Nei prossimi capitoli, vedremo come si è arrivati nel corso dei decenni a costruire una trappola infallibile per inchiodare una volta per tutte i misteriosi numeri del Cosmo.

# ·2·

# Prima luce

*E separò la luce dalle tenebre.*

*Genesi 1, 4*

Il modello cosmologico che cominciava a emergere nella prima metà del XX secolo grazie alle straordinarie conquiste teoriche di Einstein e alle brillanti osservazioni astronomiche di Hubble era ancora solo poco più di uno schema concettuale. Friedmann, essendo un matematico, si era preoccupato soprattutto che le sue soluzioni delle equazioni di Einstein fossero corrette da un punto di vista formale. Egli aveva definito soltanto la cornice degli avvenimenti cosmici: il modo in cui l'intelaiatura del Cosmo, la struttura dello spaziotempo, evolveva con il passare del tempo. Cercare una descrizione dei processi fisici che dovevano aver avuto luogo in un Universo in espansione non rientrava nei suoi interessi e nelle sue competenze. Altri studiosi presero in mano il testimone e tentarono di giungere a un quadro coerente dello stato fisico che lo strano Universo dinamico di Friedmann e Hubble doveva aver attraversato durante le varie fasi della sua evoluzione.

Questa indagine mise ben presto in evidenza il fatto che un Universo in espansione doveva necessariamente aver attraversato un periodo caratterizzato da valori di temperatura, densità ed energia enormemente più grandi di quelli attuali: una condizione talmente estrema che nulla di quello che conosciamo oggi

avrebbe potuto esistere nella stessa forma. Ma fu anche chiaro che una fase così violenta dell'evoluzione cosmica non poteva essere finita senza lasciare alcuna traccia. Se davvero l'Universo si era evoluto a partire da una fase densa e calda, un tiepido residuo di quell'energia primordiale doveva ancora essere diffuso in tutto lo spazio.

Bisognava soltanto trovarlo.

## Ma che caldo fa

Prima di metterci alla ricerca della traccia fossile del Big Bang, dobbiamo capire un po' meglio quello che accade al contenuto dell'Universo durante l'espansione, una cosa che l'esposizione fatta nel capitolo precedente non teneva in nessuna considerazione. Finora, ci siamo sempre riferiti alla "materia" per parlare di ciò che "riempie" l'Universo. È abbastanza chiaro che cosa intendiamo quando parliamo di materia nel Cosmo attuale, ma siamo sicuri che la materia sia stata sempre nelle stesse condizioni anche in fasi precedenti dell'evoluzione dell'Universo? È venuto il momento di guardare questo aspetto della questione un po' più da vicino.

Nello stesso periodo in cui Einstein ideava la teoria della relatività e Hubble si interrogava sulle reali dimensioni dell'Universo, altri studiosi stavano gettando le basi per la descrizione della materia nei suoi aspetti microscopici. Le scoperte del fisico Ernest Rutherford mostrarono, all'inizio del XX secolo, che la materia è composta di *atomi*. Sebbene esistano molti tipi diversi di atomi, che sono responsabili del comportamento chimico delle diverse sostanze, tutti gli atomi sono fatti degli stessi mattoni: un *nucleo* centrale molto pesante e carico positivamente, attorno al quale si muovono, come un nugolo di moscerini attorno a una lampada, particelle più leggere e di carica elettrica negativa, gli *elettroni*. Il nucleo è a sua volta composto di particelle che hanno la stessa carica elettrica degli elettroni, ma positiva, i *protoni*, e di particelle senza carica elettrica, i *neutroni*[1]. Un atomo non ha carica elettrica, e deve quindi contenere lo stesso

[1] A loro volta, i protoni e i neutroni sono costituiti da particelle ancora più elementari, i *quark*. Questo non è però rilevante per quanto diremo nel seguito.

numero di protoni e di elettroni (il numero di neutroni può invece variare, dando vita così a diversi *isotopi* dello stesso atomo). A seconda del numero di elettroni che contengono, gli atomi possono legarsi ad altri atomi in modi e strutture diverse, formando ad esempio cristalli o molecole complicate. Gli atomi danno vita così, in una specie di gioco di costruzioni, a tutta la materia che ci circonda.

È chiaro che una delle inevitabili caratteristiche di un Universo in espansione è quella di non rimanere perennemente nello stesso stato. Nel modello del Big Bang, il Cosmo deve essere un sistema in continua evoluzione: il suo stato fisico muta con il passare del tempo e il suo contenuto deve assumere forme diverse in epoche diverse. Se avessimo un filmato dell'espansione cosmica e potessimo guardarlo a ritroso, vedremmo ogni cosa avvicinarsi sempre di più a ogni altra cosa mano a mano che la pellicola scorre verso i fotogrammi iniziali. Come per l'azione di una gigantesca pressa, l'intero contenuto dell'Universo ci apparirebbe schiacciarsi progressivamente in uno spazio sempre più ristretto, in un volume delle dimensioni della Terra, di un pallone da calcio, di una pallina da tennis, di una biglia... Proprio come la temperatura di un gas aumenta quando esso viene compresso in un volume minore, anche l'Universo dovrebbe diventare sempre più caldo man mano che ci si avvicina all'istante iniziale. Per dare un'idea delle quantità in gioco, dieci giorni dopo il Big Bang, tutto l'Universo doveva essere caldo come l'interno del nostro Sole, circa 10 milioni di gradi centigradi. Un centomillesimo di secondo dopo il Big Bang, la temperatura doveva essere un milione di volte più alta. In una situazione del genere, che ne sarebbe della materia che conosciamo?

Nella nostra esperienza ordinaria, la materia ci si presenta in tre stati diversi. Uno *stato solido*, in cui il legame tra i vari atomi che la compongono è molto forte ed essi sono impacchettati in strutture molto rigide. Uno *stato liquido*, in cui gli atomi sono legati più debolmente e cambiano posizione con una certa facilità. Uno *stato gassoso*, in cui gli atomi interagiscono in maniera debolissima e sono di fatto liberi di muoversi in modo indipendente. Come sappiamo, la materia può esistere in ciascuno dei tre stati, e la scelta tra uno dei tre dipende, in condizioni normali, essenzialmente dalla temperatura. Se mettiamo

un metallo in una fornace e alziamo progressivamente la temperatura, esso, da solido che era, diventerà dapprima liquido e infine, a temperature enormi, gassoso.

Esiste però un quarto possibile stato della materia, che ci è molto meno familiare: quello in cui persino il legame tra elettroni e nuclei viene spezzato, e la materia diventa una miscela di nuclei atomici (carichi positivamente) e elettroni (carichi negativamente) senza legami stabili. I fisici chiamano questo stato della materia *plasma*. Non dovete pensare a qualcosa di particolarmente esotico: c'è del plasma all'interno di ogni lampada al neon accesa e, ovviamente, negli schermi al plasma.

Sebbene la quantità di energia necessaria a portare la materia ordinaria in uno stato di plasma non si incontri di frequente nella vita di tutti i giorni, nell'Universo primordiale c'era un tale calore da fare a pezzi tutta la materia fino all'ultimo atomo e da strappare via tutti gli elettroni dai nuclei atomici. Nelle sue prime fasi di vita, l'Universo era semplicemente un enorme calderone di plasma caldissimo. Questa immensa brodaglia incandescente distribuita in modo pressoché omogeneo e con una temperatura uniforme di circa un miliardo di gradi era tutto quello che avreste incontrato nell'Universo pochi minuti dopo il Big Bang. Il fatto che l'Universo sia passato attraverso una fase così drammatica e inospitale può sembrare sconcertante se lo giudichiamo secondo i nostri canoni abituali, ma è una benedizione per i cosmologi. Il Cosmo primordiale era un ambiente relativamente semplice, che può essere compreso con strumenti che la fisica moderna ha a portata di mano.

È naturale e umano tentare di correre con il pensiero, per quanto possibile, a quei primi momenti, crearsi raffigurazioni mentali di quello che deve essere accaduto nel Cosmo primordiale, quando un calore al di là di ogni possibilità di comprensione devastava la struttura stessa della materia, quando in una minuscola frazione di spazio era contenuta la massa equivalente a centinaia di miliardi di galassie. Se uno degli ingredienti della vostra immagine interiore è la presenza di un bagliore accecante, se avete fantasticato di uno spazio rischiarato dal fulgore di un'aurora abbacinante, non siete andati molto lontani dalla descrizione dei primi istanti dell'Universo che si ricava dalle moderne teorie cosmologiche. Effettivamente, per comprendere

un po' meglio lo stato dell'Universo nelle fasi immediatamente successive al Big Bang è giunto il momento di dire qualcosa sull'unico altro inquilino che condivideva con la materia in frantumi il Cosmo appena nato: la luce.

## Onda su onda

La luce è talmente importante per gli uomini, persi in un Universo per lo più completamente buio e freddo, da aver stimolato la fantasia creatrice dei poeti di tutte le epoche, ed essere stata alimento per le metafore più affascinanti. Nell'ultimo canto del *Paradiso*, Dio stesso si mostra a Dante sotto forma di una luce accecante da cui è impossibile distogliere lo sguardo. Nel linguaggio più prosaico dei fisici, la luce non è altro che una delle manifestazioni di un fenomeno noto come *radiazione elettromagnetica*. La radiazione elettromagnetica è il modo che la natura ha escogitato per trasportare energia da un punto all'altro dello spazio vuoto, senza avere bisogno di un mezzo che faccia da intermediario.

Questo trasporto avviene attraverso la propagazione di *onde*, una caratteristica comune a molti fenomeni fisici prodotti da un qualche meccanismo oscillatorio (figura 2.1). Potete voi stessi creare un'onda consegnando a un amico il capo di una corda e muovendo l'altro capo in su e in giù con regolarità. Le onde che compongono la luce sono generate in modo diverso, attraverso la vibrazione di campi elettrici e magnetici, ma la loro descrizione matematica è fondamentalmente la stessa. Ogni onda è caratterizzata da una *frequenza*, che misura quante sono le oscillazioni compiute in un certo intervallo di tempo. La frequenza di un'onda si misura in Hertz (simbolo Hz): una frequenza di 1 Hz significa che l'onda compie un'oscillazione completa una volta al secondo. Se conoscete la velocità di propagazione dell'onda nello spazio potete dividerla per la frequenza, ottenendo così la *lunghezza d'onda*, cioè la distanza che passa tra due punti dell'onda che si trovano nella stessa fase di oscillazione, per esempio tra due creste. A parità di velocità di propagazione, un'onda di frequenza più alta avrà naturalmente una lunghezza d'onda più piccola, perché i massimi delle oscillazioni saranno più vici-

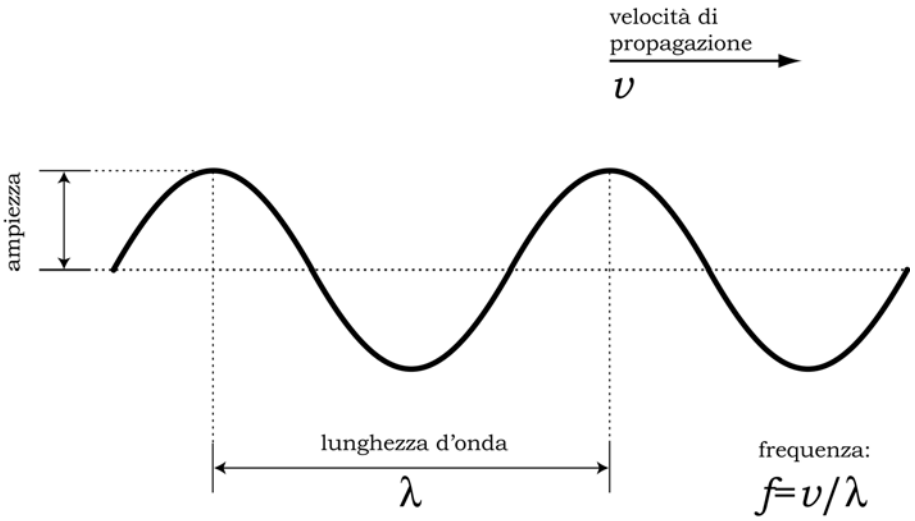



Figura 2.1: Lo schema di un'onda di frequenza $f$ e lunghezza d'onda $\lambda$ che si propaga a velocità $v$.

ni tra loro. Le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto alla velocità della luce: una frequenza di 1 Hz corrisponde quindi a una lunghezza d'onda di ben 300 mila chilometri, mentre per 1 miliardo di Hz si avrà una lunghezza d'onda di soli 30 cm. L'energia trasportata da un'onda elettromagnetica è direttamente proporzionale alla sua frequenza. Tanto maggiore è la frequenza dell'onda (e più corta la lunghezza d'onda), tanto più grande sarà l'energia della radiazione.

I nostri occhi sono sensibili soltanto a onde elettromagnetiche che hanno valori di frequenze (o di lunghezze d'onda) compresi in un intervallo molto piccolo. All'interno di questo intervallo, onde che vibrano a diverse frequenze ci appaiono semplicemente come luce di colore diverso. La frequenza maggiore (ovvero la radiazione elettromagnetica di energia più alta) che possiamo osservare è quella che corrisponde alla luce violetta; quella minore corrisponde alla luce rossa. Tra questi due estremi si situano tutti gli altri colori dell'iride. La differenza tra la luce emessa da una lampadina e le onde elettromagnetiche ricevute da una radio sta dunque unicamente nella frequenza della radiazione corrispondente. Per avere un'idea, la lunghezza delle

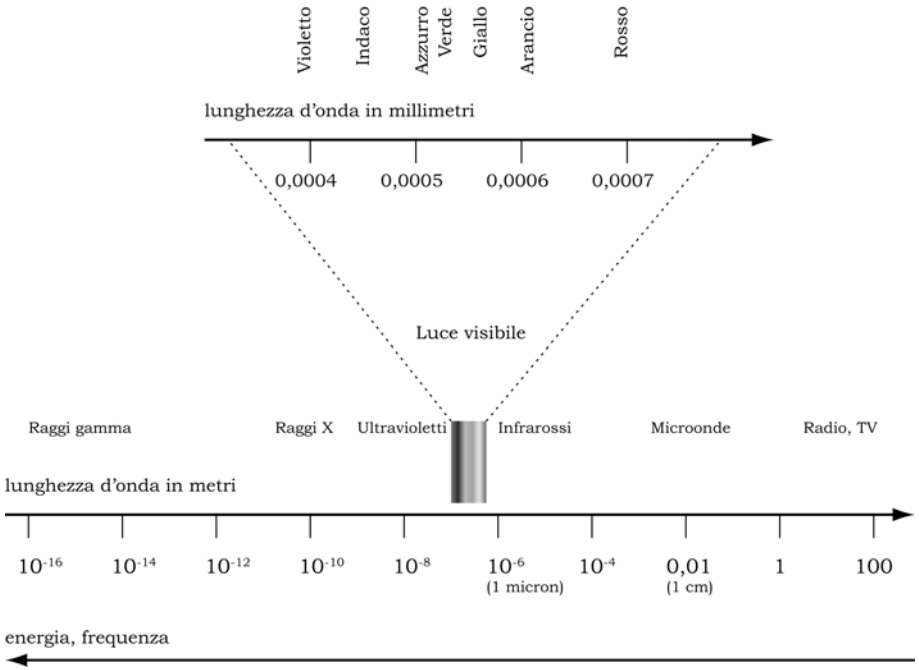



Figura 2.2: Diversi tipi di radiazione elettromagnetica corrispondenti a diverse lunghezze d'onda. La luce visibile corrisponde a un intervallo molto ristretto.

onde radio FM è di qualche metro, mentre i nostri occhi possono percepire soltanto lunghezze d'onda molto più piccole di un millimentro, comprese all'incirca tra 0,0004 mm e 0,0007 mm. Anche le *microonde*, come quelle usate dai forni per riscaldare le pietanze, hanno una lunghezza d'onda maggiore di quella della luce visibile. Dall'altro lato dell'intervallo, cioè a lunghezze d'onda molto più piccole di quelle che i nostri occhi possono vedere, ci sono, ad esempio, i *raggi ultravioletti* e i *raggi X*. L'insieme di tutti i possibili valori di lunghezza d'onda che può assumere un onda elettromagnetica costituisce quello che viene chiamato *spettro elettromagnetico* (figura 2.2).

Una delle grandi scoperte di Einstein (per la quale ottenne il premio Nobel nel 1929) fu quella di associare la produzione di onde elettromagnetiche alla creazione di particelle che furono chiamate *fotoni*. In altre parole, è possibile immaginare la luce non soltanto come un'onda (o, meglio, una sovrapposizione di

onde), ma anche come composta da un gran numero di fotoni: la quantità di energia emessa da una sorgente luminosa dipende sia dalla frequenza dell'onda, sia dal numero di fotoni prodotti. Dal momento in cui accendete una comunissima lampadina da 100 W, cominciate a essere investiti da un flusso di qualche centinaio di miliardi di miliardi di fotoni al secondo.

I fotoni hanno una serie di caratteristiche davvero singolari. Tanto per cominciare, non possono avere una massa. Se essi avessero una massa, infatti, potremmo pensare di frenarli, o addirittura fermarli completamente, per esempio legandoli gravitazionalmente a un'altra massa gigantesca. Ma, secondo la teoria della relatività speciale di Einstein, la luce non può essere fermata, quindi i fotoni devono essere privi di massa. I fotoni sono quindi condannati a muoversi in continuazione in linea retta, e sempre alla stessa velocità, la velocità della luce, appunto. Ma non finisce qui. Dal momento che anche una sorgente luminosa talmente debole da emettere un solo fotone deve necessariamente emettere un'onda elettromagnetica, ogni singolo fotone deve avere allo stesso tempo le caratteristiche di una particella e anche quelle di un'onda! Si parla quindi normalmente di lunghezza d'onda di un fotone, o di frequenza di un fotone, per riferirsi all'onda elettromagnetica associata a quel fotone. Infine, contrariamente a quello che avviene con le particelle "normali", l'energia di un fotone non ha nulla a che fare con la sua velocità: un fotone viaggia sempre alla velocità della luce, qualunque sia la sua energia. L'energia di un fotone è semplicemente quella dell'onda corrispondente, cioè è proporzionale alla sua frequenza.

La natura ondulatoria della luce ha una manifestazione evidente in un fenomeno, noto come *effetto Doppler*, che ha avuto una grande importanza nello sviluppo dell'astronomia. L'effetto Doppler descrive la variazione della frequenza di un'onda emessa da una sorgente che si muove rispetto all'osservatore (figura 2.3). Abbiamo tutti prima o poi fatto esperienza dell'effetto Doppler nel caso delle onde sonore: il suono della sirena di un'ambulanza ci appare più acuto quando questa si sta avvicinando, e più grave quando si allontana. Lo stesso avviene con le onde luminose: la luce della sirena dovrebbe quindi apparirci più blu (cioè con una frequenza maggiore) mentre l'ambulanza ci vie-

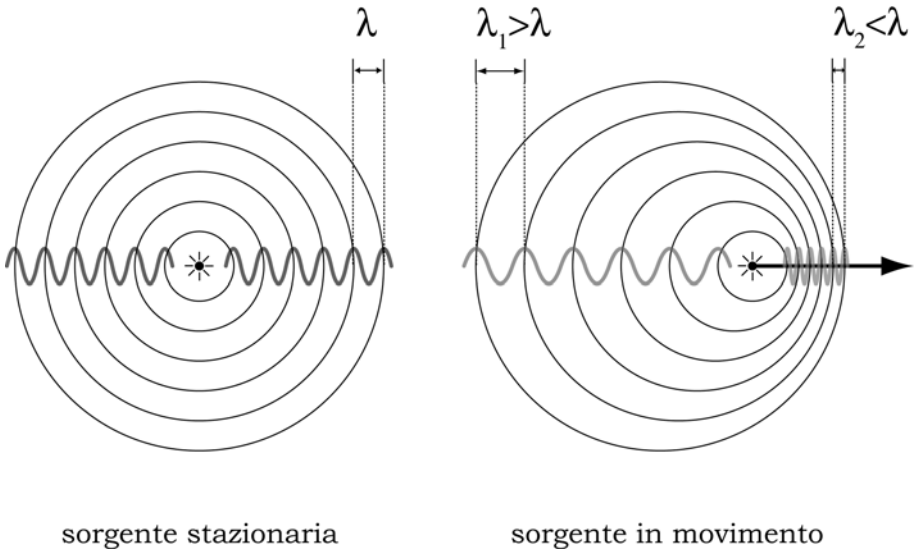



Figura 2.3: L'effetto Doppler altera la lunghezza dell'onda emessa da una sorgente in movimento: le creste dell'onda (che sono prodotte a intervalli di tempo regolari) si addensano nella direzione del moto, e si diradano nella direzione opposta. Un osservatore fermo misurerà quindi una lunghezza d'onda minore ($\lambda_2$) se la sorgente gli viene incontro, maggiore ($\lambda_1$) se si allontana.

ne incontro, e più rossa (frequenza minore) quando è passata. Ovviamente, mentre anche i meno dotati di orecchio musicale riescono tranquillamente a percepire la differenza di tono nel suono della sirena in movimento, nessuno di noi è in grado di cogliere la differenza di colore nella sua luce. Il fatto è che la quantità che controlla la variazione di frequenza è il rapporto tra la velocità della sorgente e la velocità di propagazione dell'onda. Nel caso della luce, per poterci accorgere a occhio della differenza di frequenza, la velocità dell'ambulanza dovrebbe essere confrontabile con quella della luce, una cosa che non capita tutti i giorni! Nel caso di oggetti astronomici come stelle o galassie, attraverso apparecchi sofisticati in grado di misurare piccole variazioni di frequenza nella luce osservata, si può usare l'effetto Doppler per misurare la velocità di allontanamento o avvicinamento. Questo è in realtà esattamente il metodo impiegato da Hubble per misurare la velocità di allontanamento delle galassie.

Fu proprio il fatto che la luce delle galassie osservate era sempre più rossa di quello che avrebbe dovuto (mostrando quindi che il moto era sempre un allontanamento, mai un avvicinamento) a insospettire Hubble.

Chiusa questa parentesi sull'effetto Doppler, che ci sarà più volte utile in seguito, e compresa un po' meglio la natura fisica della luce, possiamo tornare a occuparci dello stato dell'Universo dopo il Big Bang. Abbiamo a che fare con un plasma incandescente, una zuppa caldissima di elettroni e nuclei atomici; ma dobbiamo ora chiarire meglio il ruolo svolto dai fotoni, ovvero dalla radiazione elettromagnetica. In altre parole, vorremmo capire quali caratteristiche doveva avere la luce che splendeva nell'alba cosmica. Anche in questo caso, la natura ci semplifica il compito, dal momento che lo stato dell'Universo primordiale rassomiglia molto a quello di altri sistemi fisici che ci sono più familiari.

## Stelle e forni

È estremamente difficile notarlo nei cieli inquinati delle nostre città, ma ogni stella ha un suo colore caratteristico. Alcune stelle hanno una sfumatura bluastra, come Sirio o Rigel, altre, come Antares o Aldebaran, rossiccia; il nostro Sole dà sul giallo. Gli astronomi usano da molto tempo questo fatto per misurare la temperatura superficiale delle stelle. Questo è possibile perché le energie dei fotoni emessi da una stella non sono casuali, ma seguono una ben precisa *distribuzione*, ovvero una legge che stabilisce quanti fotoni devono avere una certa energia, quanti un'altra, e così via. La forma di questa distribuzione è a sua volta legata in modo molto preciso alla temperatura della stella.

Per strano che possa sembrare, la legge che regola la distribuzione delle energie dei fotoni emessi da una stella è la stessa che stabilisce quella dei fotoni contenuti in un forno vuoto riscaldato a una certa temperatura, un sistema molto vicino a quello che i fisici chiamano *corpo nero* e di cui hanno compreso nel dettaglio le proprietà solo all'inizio del XX secolo. Fu il fisico Max Planck a calcolare per primo la forma corretta della distribuzione energetica dei fotoni in un corpo nero e a stabilirne la

dipendenza dalla temperatura. Data una certa temperatura, le onde elettromagnetiche contenute nella cavità del forno non si distribuiscono tutte con la stessa intensità: la maggior parte dei fotoni nella cavità ha una lunghezza d'onda vicina a un valore caratteristico. La distribuzione energetica dei fotoni (e quindi la posizione in frequenza del massimo di intensità) dipende esclusivamente dalla temperatura del corpo nero; a ogni temperatura corrisponde inoltre una sola e ben distinta distribuzione (figura 2.4). Se quindi si misura la curva di energia di un corpo nero (o anche soltanto la frequenza alla quale viene emesso il massimo di energia) è possibile stabilirne con grande precisione la temperatura. Quando un forno è riscaldato intorno ai 200 °C, la maggior parte dell'energia è emessa intorno a lunghezze d'onda invisibili all'occhio umano, nella banda dell'infrarosso. Perché esso cominci a emettere una quantità sufficiente di luce visibile bisogna portarlo intorno ai 500 °C, quando comincerà a diventare rosso incandescente. Le stelle, così come il filamento di una comune lampadina, hanno una temperatura superficiale di oltre 3000 °C, che le porta a emettere la maggior parte della loro energia sotto forma di luce visibile. La loro luce è quindi un miscuglio di onde di tutte le lunghezze d'onda, e apparirà perciò prevalentemente bianca, ma avrà una caratteristica sfumatura di colore, in corrispondenza del massimo di energia emessa. È proprio questo caratteristico colore che permette, attraverso la determinazione della corrispondente curva di corpo nero, di misurare la temperatura superficiale delle stelle.

Oltre che nello studio dello stelle, la distribuzione di corpo nero è di cruciale importanza anche nell'ambito del modello del Big Bang, in quanto permette di descrivere il comportamento della radiazione elettromagnetica nelle prime fasi di vita dell'Universo. Il corpo nero è infatti un esempio perfetto di una situazione in cui la radiazione si trova in *equilibrio termico* con la materia. Cerchiamo di chiarire meglio questo concetto importantissimo e il motivo per cui esso si applica allo stato fisico dell'Universo primordiale.

Considerate la stanza in cui vi trovate in questo momento. Siete immersi nella radiazione elettromagnetica che arriva da qualche sorgente luminosa, sia essa il Sole o una comune lampadina. Le onde elettromagnetiche all'interno della stanza si

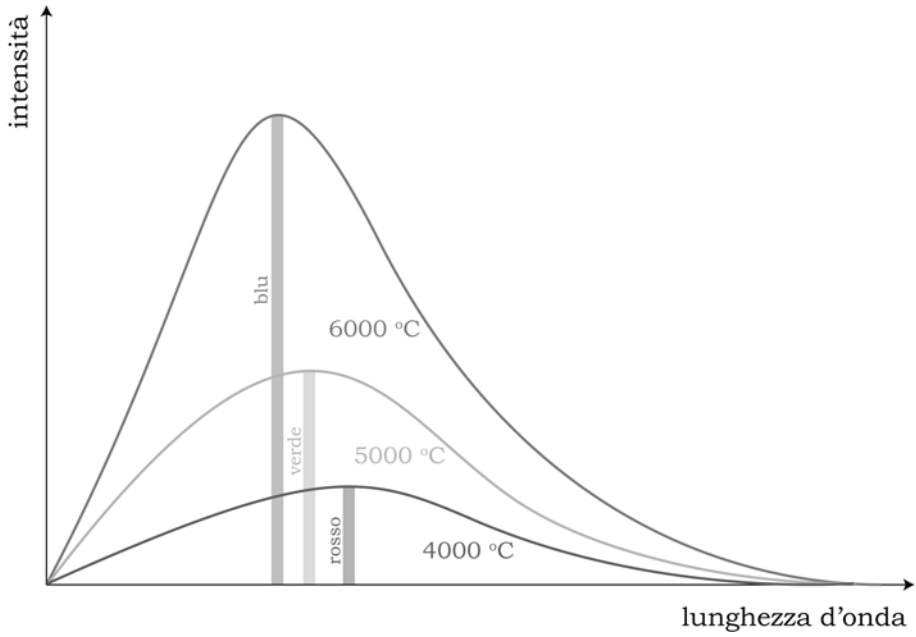



Figura 2.4: La distribuzione energetica dei fotoni in un corpo nero. Ciascuna curva corrisponde a una diversa temperatura: per queste temperature, il massimo di intensità della radiazione è emesso intorno a lunghezze d'onda corrispondenti a diversi colori di luce visibile.

comportano in modo complicato: rimbalzano sugli oggetti che incontrano, sulle pareti della stanza, si diffondono attraverso le molecole dell'aria. Ogni oggetto, a seconda delle sue caratteristiche o della posizione nella stanza, assorbirà la luce e verrà scaldato in maniera diversa. Allo stesso tempo, i vari corpi presenti nella stanza potrebbero essere a loro volta sorgenti elettromagnetiche, seppure non di luce visibile. Il vostro corpo è una sorgente di calore intorno ai 36 °C, ed emette molta radiazione elettromagnetica infrarossa. Questa è una chiara situazione di disequilibrio tra radiazione e materia. In questa situazione, non sareste in grado di descrivere in modo semplice lo stato della radiazione elettromagnetica presente nella stanza: dovreste tenere conto di tutte le sorgenti e di tutti i fenomeni di assorbimento e emissione che vi hanno luogo. Una situazione piuttosto complicata.

Ora, immaginate una situazione completamente diversa: alcuni oggetti metallici vengono posti in una fornace, e la temperatura viene alzata progressivamente. Inizialmente, la situazione sarà identica a quella della vostra stanza: ciascun oggetto assorbirà ed emetterà radiazione in modo diverso. Man mano che la temperatura sale, però gli oggetti cominceranno a fondersi, perderanno la loro individualità e finiranno per mescolarsi in un unico magma incandescente. Continuiamo ad alzare la temperatura: gli atomi si separeranno l'uno dall'altro, e riempiranno la cavità in modo omogeneo, in preda a una frenetica agitazione. Questa è una situazione che si avvicina molto all'equilibrio termico perfetto. Non sarà più necessario conoscere in dettaglio lo stato dei singoli atomi: basterà la sola conoscenza della temperatura del forno per avere tutte le informazioni sufficienti a descrivere il sistema. In particolare, la radiazione all'interno della fornace sarà distribuita in modo molto prossimo a quella caratteristica di un corpo nero.

L'Universo attuale è molto lontano da una situazione di equilibrio termico tra materia e radiazione. Sorgenti di radiazione come le stelle, con temperature superficiali di migliaia di gradi, coesistono con enormi regioni di spazio vuoto e freddo. Nell'Universo primordiale, invece, la situazione era tale che l'equilibrio termico tra materia e radiazione era perfetto. A tempi sufficientemente vicini al Big Bang, c'era talmente tanta energia nella radiazione elettromagnetica da scomporre completamente la materia nei suoi componenti fondamentali: una situazione molto simile a quella di una fornace incandescente. Il plasma primordiale e i fotoni erano mischiati fra loro fino a formare un unico fluido con una temperatura comune, come il latte e il caffè in un cappuccino.

Per capire che fine fa questo cappuccino cosmico dobbiamo ritornare a quello che sappiamo sull'evoluzione dell'Universo. Abbiamo detto che il fatto che l'Universo si espande va interpretato nella seguente maniera: la distanza tra due punti qualunque nell'Universo cresce con il passare del tempo. Che succede allora se osserviamo la distanza tra due oscillazioni di un'onda elettromagnetica, cioè la sua lunghezza d'onda, al passare del tempo? Anche questa distanza, come ogni altra, risente dell'espansione: quindi la conclusione a cui dobbiamo giungere è

che, secondo il modello del Big Bang, la lunghezza d'onda di una qualsiasi onda elettromagnetica aumenta con il passare del tempo. Ovviamente, per poter notare questo fatto bisognerebbe osservare l'onda per tempi molto lunghi, abbastanza perché l'espansione faccia variare la sua lunghezza d'onda in modo apprezzabile. In gergo tecnico, questo fenomeno si chiama *redshift*, ovvero "spostamento verso il rosso". Si riferisce semplicemente al fatto che la luce rossa è quella che ha la lunghezza d'onda maggiore tra tutti i tipi di luce visibile: quindi, se allunghiamo la lunghezza d'onda della luce emessa da una sorgente luminosa, la vedremo assumere una colorazione sempre più rossa. Ovviamente, lo stesso discorso vale per tutti i tipi di radiazione elettromagnetica, anche per quella che non possiamo vedere, come le onde radio o i raggi X. In questo caso, parlare di spostamento verso il rosso non ha nessun senso, ma il termine *redshift* si usa ugualmente.

Il fatto che l'espansione dell'Universo altera la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica ha una conseguenza molto importante. Ogni singolo fotone presente oggi nell'Universo aveva nel passato una lunghezza d'onda più piccola, e quindi un'energia più alta. Per istanti sempre più vicini al Big Bang, l'energia di tutti i fotoni dell'Universo diventa arbitrariamente alta. È esattamente questa la fonte dell'enorme calore che incendiava l'alba cosmica. Al contrario, man mano che l'Universo si espande, la lunghezza d'onda dei fotoni aumenta e la loro energia diminuisce. Ma la distribuzione di energia dei fotoni durante l'espansione dell'Universo rimane quella caratteristica di un sistema in equilibrio termico, cioè quella di un corpo nero. Questo fatto ha implicazioni profondissime per la cosmologia, che esploreremo in dettaglio tra poco. Prima però, dobbiamo aprire una parentesi su una questione non meno interessante, che riguarda la composizione del plasma primordiale.

## Alta cucina

Finora, abbiamo sempre parlato dei nuclei atomici presenti nel plasma primordiale in modo generico. Ma sappiamo che in natura esistono molti tipi diversi di atomi, il cui nucleo si differenzia

per il numero di protoni e di neutroni da cui è composto. Esistono atomi molto pesanti, come il piombo, il cui nucleo contiene 82 protoni (e 125 neutroni nell'isotopo più comune); e atomi più leggeri, come il litio, il cui nucleo contiene solo 3 protoni (e 4 neutroni). Inoltre, nell'Universo attuale, gli atomi di tipo diverso non sono tutti ugualmente comuni: alcuni atomi fanno la parte del leone. Gli atomi presenti oggi nel nostro Universo sono, al 99,9%, di due soli tipi: *idrogeno* ed *elio*. Tutti gli altri atomi si devono dividere quel restante 0,1%. È una cosa davvero strana, se pensiamo alla materia di cui abbiamo esperienza quotidiana. Tutti i metalli, come il ferro, l'oro, il rame; tutti gli atomi che compongono le rocce del nostro pianeta, come il silicio e il calcio; quelli che si trovano nelle molecole del nostro corpo, come il carbonio; quelli presenti nell'atmosfera terrestre, come l'ossigeno e l'azoto: non sono che una percentuale misera dell'intero contenuto dell'Universo. L'idrogeno è in assoluto l'atomo più frequente nell'Universo: la massa di tutti gli atomi di idrogeno costituisce circa il 75% della massa totale della materia atomica. L'elio è all'incirca il 24%. Il nucleo di un atomo di idrogeno è il più semplice che si possa immaginare: è fatto di un solo protone. Quello dell'elio contiene invece due protoni e due neutroni.

Uno dei punti di forza del modello del Big Bang è quello di saper prevedere correttamente l'abbondanza di elio osservata nell'Universo attuale. Secondo questo modello, infatti, la maggior parte dei nuclei di elio presenti oggi nell'Universo si è formata proprio durante la fase calda e densa seguita al Big Bang. Il processo fisico che porta alla formazione di nuclei di elio partendo da due protoni e due neutroni è un esempio di reazione di *fusione nucleare*. La fusione di due protoni e due neutroni in un nucleo di elio non avviene in modo spontaneo. Bisogna prima vincere la repulsione elettrica tra i protoni (che hanno carica positiva): solo quando i protoni sono abbastanza vicini tra loro entra in gioco un diverso tipo di interazione, la *forza nucleare forte*, che riesce a tenere impacchettati i protoni nel nucleo.

Per portare i protoni alla distanza richiesta bisogna che siano presenti condizioni straordinarie di pressione e temperatura. Queste condizioni si verificano normalmente all'interno delle stelle, e infatti oggi si sa che tutti gli atomi più pesanti presenti nell'Universo sono stati "cucinati" nel corso di miliardi di anni

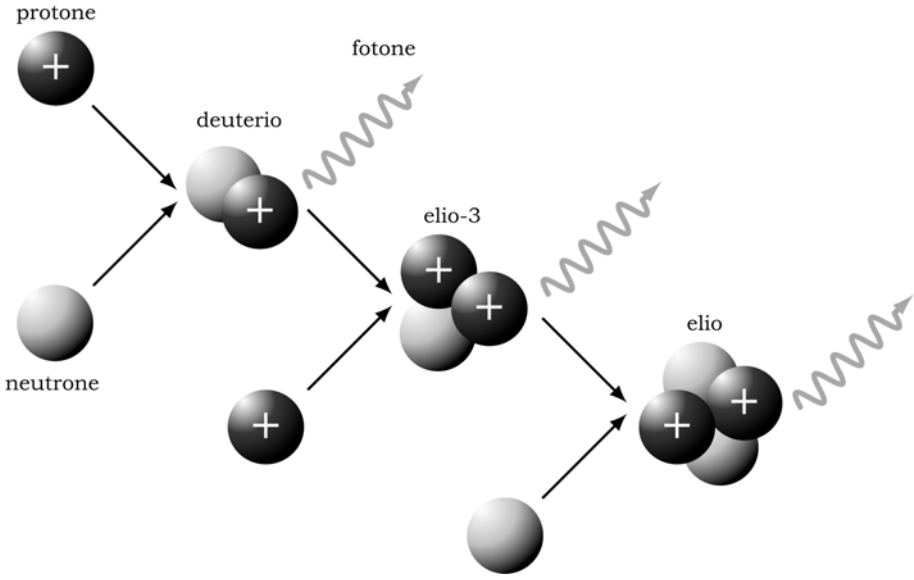



Figura 2.5: Uno dei processi che portano alla formazione di nuclei di elio nell'Universo primordiale: un protone e un neutrone formano un nucleo di deuterio; poi, con l'aggiunta di un protone, un nucleo di elio-3 (un isotopo dell'elio); infine, con l'aggiunta di un neutrone, un nucleo di elio.

nelle fornaci stellari. Nel caso dell'elio, tuttavia, questa spiegazione non è soddisfacente. Per creare tutto l'elio presente oggi nell'Universo, infatti, i processi stellari avrebbero avuto bisogno di un tempo molto lungo, diverse decine di miliardi di anni. Ma le stelle più vecchie dell'Universo hanno "solo" poco più di dieci miliardi di anni. In questo lasso di tempo può essere stato prodotto appena l'1% dell'elio complessivo.

Secondo il modello del Big Bang, però, l'intero Universo è stato, nelle fasi più remote della sua esistenza, molto più caldo e denso di qualsiasi stella. Una volta che la temperatura fosse scesa sotto una certa soglia (circa un miliardo di gradi, così da consentire la formazione stabile di nuclei di *deuterio*, un isotopo dell'idrogeno composto di un protone e di un neutrone), le reazioni di fusione nucleare avrebbero rapidamente portato alla formazione di nuclei di elio, impiegando tutti i neutroni disponibili nell'Universo (figura 2.5).

In effetti, secondo i calcoli dei cosmologi, entro circa tre minuti dall'istante iniziale si formarono precisamente tutti i nuclei di elio richiesti per spiegare l'abbondanza osservata nell'Universo attuale (ovvero quel 24% circa della massa totale di atomi impossibile da spiegare con la produzione all'interno delle stelle). Tracce minime di altri nuclei atomici leggeri vennero prodotti in quel lasso di tempo, come il litio, che contiene tre protoni e quattro neutroni. Da quel momento in poi, però, sebbene la temperatura fosse ancora di centinaia di milioni di gradi, l'Universo era diventato un posto troppo poco denso per poter continuare a fondere nuclei atomici. Le quantità di nuclei leggeri prodotte fino ad allora si ritrovarono quindi "congelate" al valore raggiunto, mentre tutti i nuclei più pesanti dovettero aspettare miliardi di anni per essere prodotti all'interno delle stelle.

Il processo che abbiamo sommariamente descritto, ovvero la produzione dei nuclei di elio e di altri atomi leggeri nei primi istanti di vita dell'Universo, è chiamato dai cosmologi *nucleosintesi primordiale*. Attraverso calcoli dettagliati, i cosmologi possono prevedere con precisione quali dovrebbero essere oggi le abbondanze delle specie prodotte durante la nucleosintesi primordiale, e confrontarle con quelle effettivamente osservate. Il fatto che si riesca a spiegare l'abbondanza di elio, e che anche le previsioni teoriche per gli altri nuclei leggeri combacino con le osservazioni, è un enorme successo per il modello del Big Bang.

Ma c'è un altro aspetto della nucleosintesi primordiale che ha un'importanza cruciale per la cosmologia. Le quantità esatte dei diversi nuclei leggeri prodotti durante i primi tre minuti risentono in modo molto forte del numero di protoni e neutroni presenti nell'Universo. Attraverso il confronto tra le previsioni della nucleosintesi primordiale e le osservazioni, i cosmologi sono quindi in grado letteralmente di contare quanti protoni e quanti neutroni esistono oggi nel Cosmo. I protoni e i neutroni hanno una massa circa mille volte più grande di quella degli elettroni. Costituiscono quindi il grosso del "peso" di un atomo e, per questo motivo, vengono indicati collettivamente con il nome di *barioni*, dalla parola greca che significa "pesante". Questo significa che conoscere il numero di protoni e neutroni presenti nell'Universo equivale, di fatto, a stabilire la massa complessiva di tutti gli atomi.

Abbiamo visto alla fine del capitolo precedente che uno dei problemi della moderna cosmologia è proprio quello di stabilire la densità media dell'Universo in rapporto a quella critica, ovvero di "pesare" il contenuto dell'Universo. Ora, i calcoli della nucleosintesi primordiale e le osservazioni delle abbondanze di elementi leggeri ci permettono di stabilire con buona precisione il "peso" di tutti gli atomi del Cosmo. Il risultato, che i cosmologi hanno raffinato in decenni di studio e che oggi è ritenuto estremamente affidabile, è che la densità media di materia atomica si debba aggirare intorno al 4% del valore critico. In altre parole, la massa di tutti gli atomi dell'Universo, in qualsiasi forma essi si trovino, stelle, pianeti, asteroidi, comete, gas, esseri umani, non raggiunge neanche lontanamente il valore necessario a rendere piatto l'Universo, e ad arrestarne l'inesorabile espansione.

Questa è una conclusione molto interessante ma, come vedremo più avanti nel corso di questo libro, non mette la parola fine sull'inventario del contenuto dell'Universo.

## Il lungo addio

Dopo aver introdotto una serie di idee molto importanti, possiamo fermarci un momento e tirare le somme. Abbiamo visto che:

1. lo stato dell'Universo pochi minuti dopo il Big Bang era molto semplice: un miscuglio uniforme di plasma e radiazione. Il plasma era composto da nuclei atomici (in massima parte idrogeno ed elio) ed elettroni liberi; la radiazione da un'enorme quantità di fotoni;

2. lo stato della radiazione nell'Universo primordiale era analogo a quello della radiazione che si trova all'interno di un forno (o che viene emessa da una stella), e aveva quindi una distribuzione energetica detta di corpo nero;

3. la maggior parte dei fotoni che componevano la radiazione in ogni istante dell'evoluzione cosmica aveva un'energia prossima a un valore ben preciso, che dipendeva da un solo parametro, la temperatura;

4. la lunghezza d'onda dei fotoni che componevano la radiazione aumentava con l'espansione dell'Universo, quindi la loro energia diminuiva progressivamente.

Abbiamo detto che il plasma e la radiazione elettromagnetica erano in equilibrio termico nell'Universo primordiale, proprio come il latte e il caffè in un cappuccino. Man mano che l'Universo si espandeva, l'energia dei fotoni diminuiva (a causa dell'aumento della loro lunghezza d'onda) ma la loro distribuzione di energia restava quella di un corpo nero: il plasma e la radiazione restavano cioè in equilibrio termico. L'unica caratteristica della distribuzione di corpo nero che risentiva dell'espansione era la sua temperatura, che era anche la temperatura stessa dell'Universo (figura 2.6). Questa temperatura diminuiva con il passare del tempo, e la legge con cui avveniva la diminuzione era molto semplice. Se misuriamo la temperatura dell'Universo in Kelvin (simbolo K) ovvero i gradi centrigradi al di sopra della più bassa temperatura raggiungibile (lo *zero assoluto*, che si trova a $-273{,}15$ °C), si ha che quando le dimensioni dell'Universo raddoppiavano, la sua temperatura si dimezzava.

L'Universo primordiale era dunque come un'enorme fornace che si andava raffreddando inesorabilmente. Un immenso mare di luce pervadeva tutto il Cosmo. Ma, contrariamente a quello che potremmo pensare, tutta questa luce non poteva andare molto lontano. Il fatto è che la radiazione luminosa interagisce molto facilmente con la materia carica elettricamente. E, dal momento che l'Universo primordiale era riempito di un plasma composto proprio di particelle cariche, i fotoni rimbalzavano senza sosta da un elettrone all'altro in un percorso che assomigliava a quello delle macchinine in un autoscontro. La luce non riusciva a propagarsi a grandi distanze in queste condizioni e restava come intrappolata nella densa nube di materia. Questo fenomeno, detto di *diffusione* della radiazione, è molto simile a quello che avviene in una giornata nebbiosa: le particelle di vapore presenti nell'aria sparpagliano i raggi di luce casualmente in ogni direzione, e non è possibile vedere nulla, se non un chiarore soffuso. Allo stesso modo, l'Universo primordiale doveva apparire completamente opaco.

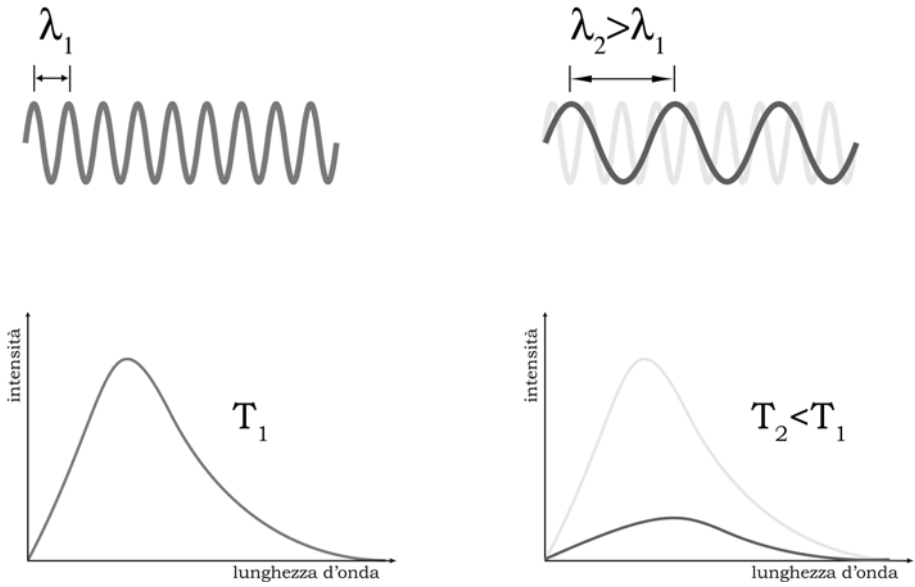



Figura 2.6: Man mano che l'Universo si espande, anche la lunghezza d'onda dei fotoni aumenta (come ogni altra distanza). La distribuzione energetica varia di conseguenza, rimanendo quella di un corpo nero, ma a temperature via via decrescenti.

Ma, a un certo punto dell'evoluzione del Cosmo, ebbe luogo una transizione nello stato della materia. I nuclei atomici e gli elettroni presenti nel plasma avevano cariche elettriche di segno opposto e si attraevano irresistibilmente. Come Renzo e Lucia, tentarono a lungo di legarsi per formare un unico atomo ma, purtroppo per loro, c'erano sempre abbastanza fotoni che, come tanti Don Rodrigo, erano dotati di energia sufficiente da impedire all'unione di concretizzarsi. Per coronare il loro sogno, i nuclei e gli elettroni dovettero aspettare che passassero circa 380 mila anni dal momento iniziale: a quel punto, l'energia della maggior parte dei fotoni era scesa al di sotto di quella necessaria a impedire la formazione degli atomi di idrogeno. I cosmologi si riferiscono a questo momento cruciale con il nome di *ricombinazione* (figura 2.7).

Allo stesso tempo, avvenne un altro fenomeno importantissimo: il *disaccoppiamento* tra la radiazione e la materia. I fotoni non interagivano più molto facilmente con gli atomi appena for-

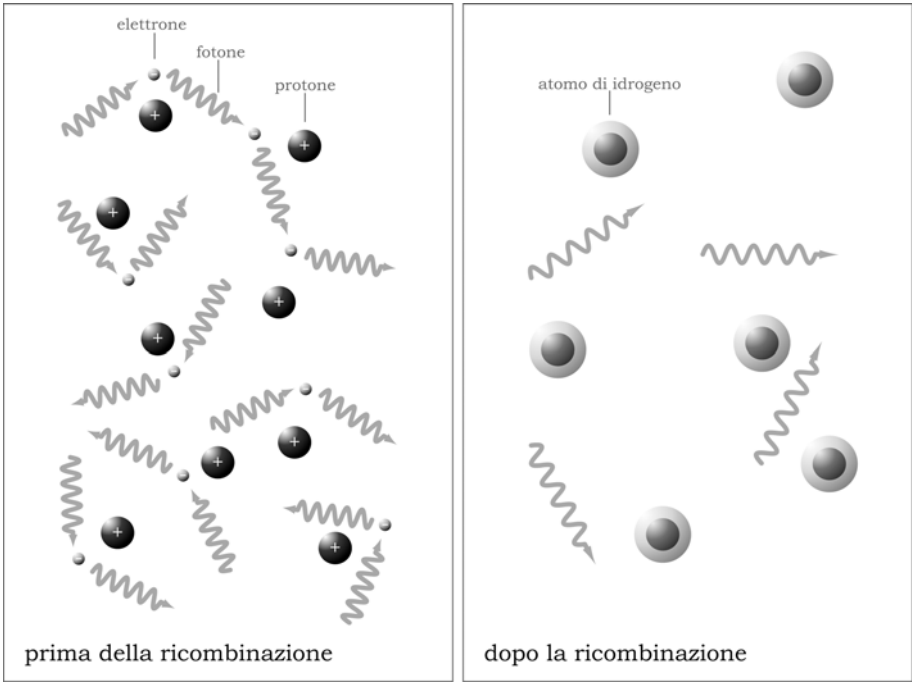



Figura 2.7: Prima della ricombinazione (sinistra), l'Universo è talmente caldo che la materia è scomposta in nuclei atomici con carica positiva ed elettroni liberi. I fotoni interagiscono continuamente con gli elettroni e non riescono a propagarsi per lunghe distanze. L'Universo è opaco. Dopo la ricombinazione (destra), i nuclei e gli elettroni si sono legati formando atomi neutri. I fotoni non interagiscono più con la materia, e possono viaggiare indisturbati. L'Universo è trasparente.

mati, privi di carica elettrica. La luce primordiale poté quindi iniziare a propagarsi liberamente, brillando in tutti gli angoli del Cosmo. L'Universo divenne trasparente. Gli atomi e i fotoni si dissere addio. La luce si separò dalla materia.

Ma ecco la più strabiliante conseguenza di tutto quello che abbiamo visto fino a questo punto. Tutti i fotoni presenti nell'Universo primordiale, sebbene così infiacchiti da non infastidire più i sogni di unione della materia – che infatti si è nel frattempo congiunta in tutte le forme meravigliose (e meno meravigliose...) che vediamo intorno a noi – tutti quei fotoni, dicevo, liberati in un'epoca incredibilmente remota, sono ancora in viaggio nel

Cosmo, e possiamo trovarli ovunque intorno a noi, come una tiepida brace dopo che si è spenta la grande fiamma, o come un'eco lontana dopo un grande boato. E questo significa che se tendiamo bene le orecchie...

Proprio così: se puntiamo un'antenna in grado di ricevere un segnale molto flebile e alle giuste frequenze, possiamo ascoltare l'eco del Big Bang. Trovare la frequenza giusta su cui regolare la nostra antenna è abbastanza semplice. Quando la radiazione si separò dalla materia, i fotoni avevano in media una lunghezza d'onda di circa 0,001 mm. Già a quell'epoca, dunque, non rientravano nell'intervallo di lunghezze d'onda visibili dall'occhio umano. Nel frattempo, secondo il modello del Big Bang, l'Universo si è espanso di circa mille volte. La lunghezza d'onda dei fotoni è diventata dunque di circa 1 mm, una quantità caratteristica di quel tipo di radiazione elettromagnetica che va sotto il nome di *microonde* (esatto, proprio quelle che usa il vostro forno per scaldarvi la pizza). Nel linguaggio tecnico dei cosmologi, questo segnale fossile rimasto dai primi istanti di vita dell'Universo si chiama perciò *radiazione cosmica di fondo a microonde*. Al momento della ricombinazione il plasma primordiale si trovava a una temperatura di circa 3000 K (ovvero 3000 gradi sopra lo zero assoluto) ma, a causa del raffreddamento avvenuto nel frattempo, la radiazione cosmica di fondo dovrebbe oggi apparirci come quella emessa da un corpo nero freddissimo, che si trovi, all'incirca, a soli 3 K. Questa dovrebbe essere la temperatura media dello spazio vuoto nell'Universo attuale: non lo zero assoluto, ma 3 miseri gradi in più, il tepore lasciato da quel fuoco primordiale estinto da miliardi di anni.

La cosa meravigliosa è che dall'ultima volta in cui urtarono un elettrone, qualche centinaio di migliaia di anni dopo il Big Bang, al momento in cui vengono catturati dalla nostra antenna, i fotoni della radiazione cosmica di fondo non hanno più avuto nessun contatto con la materia. Ognuno di quei preziosi fotoni primordiali che entrano oggi nella nostra antenna ha viaggiato nel Cosmo in linea retta dal lontano momento della ricombinazione: un cammino durato un tempo enorme, pari a circa il 99,99% dell'età dell'Universo (quest'ultima, lo abbiamo già detto, è stimata in circa 13,7 miliardi di anni). Quando la radiazione cosmica di fondo ha iniziato il suo lungo viaggio verso di noi,

l'Universo era talmente giovane che, se oggi fosse un uomo di 80 anni, allora avrebbe avuto soltanto poche ore di vita. Una volta catturati dai nostri apparati strumentali, quei fotoni ci restituiscono quindi letteralmente una fedele istantanea dell'Universo neonato.

Ma da dove arrivano esattamente i fotoni della radiazione cosmica di fondo? Possiamo vedere la cosa in questo modo. Siccome il disaccoppiamento tra materia e radiazione è avvenuto più o meno simultaneamente in tutto l'Universo, i fotoni della radiazione di fondo hanno cominciato a propagarsi liberamente più o meno tutti nello stesso momento. Ogni fotone è partito da un punto diverso del Cosmo e ha iniziato a viaggiare in una direzione diversa e completamente casuale, ma noi oggi riceviamo soltanto quelli che hanno viaggiato nella nostra direzione. Ogni fotone ha inoltre viaggiato esattamente alla stessa velocità, quella della luce. Dal momento del disaccoppiamento, dunque, tutti i fotoni avranno percorso la stessa distanza. Tirando le somme, questo significa che, dal nostro punto di vista, tutti i fotoni che riceviamo sono partiti da una enorme sfera che ci circonda completamente (figura 2.8). Una sfera con un raggio enorme, pari al cammino percorso dai fotoni dal disaccoppiamento ad oggi. Ovviamente, un altro osservatore in un altro punto completamente diverso dell'Universo si troverebbe anche lui al centro di una sfera: quella da cui giungono i fotoni che hanno viaggiato nella sua direzione.

La radiazione cosmica di fondo è quindi il segnale più antico che possiamo captare e allo stesso tempo la cosa più lontana che possiamo osservare nell'Universo. Oltre la superficie da cui ci appaiono giungere i suoi fotoni non possiamo guardare: sarebbe come volere guardare "dentro" una stella, o attraverso una spessa coltre di nuvole. Come abbiamo detto, l'Universo era infatti troppo opaco prima del disaccoppiamento. Osservare la radiazione di fondo, però, è come poter guardare direttamente la luce primeva, la "palla di fuoco" che è seguita al Big Bang: l'opportunità che la natura offre ai cosmologi è straordinaria.

Ma ci è voluto un bel po' di tempo prima che qualcuno se ne accorgesse.

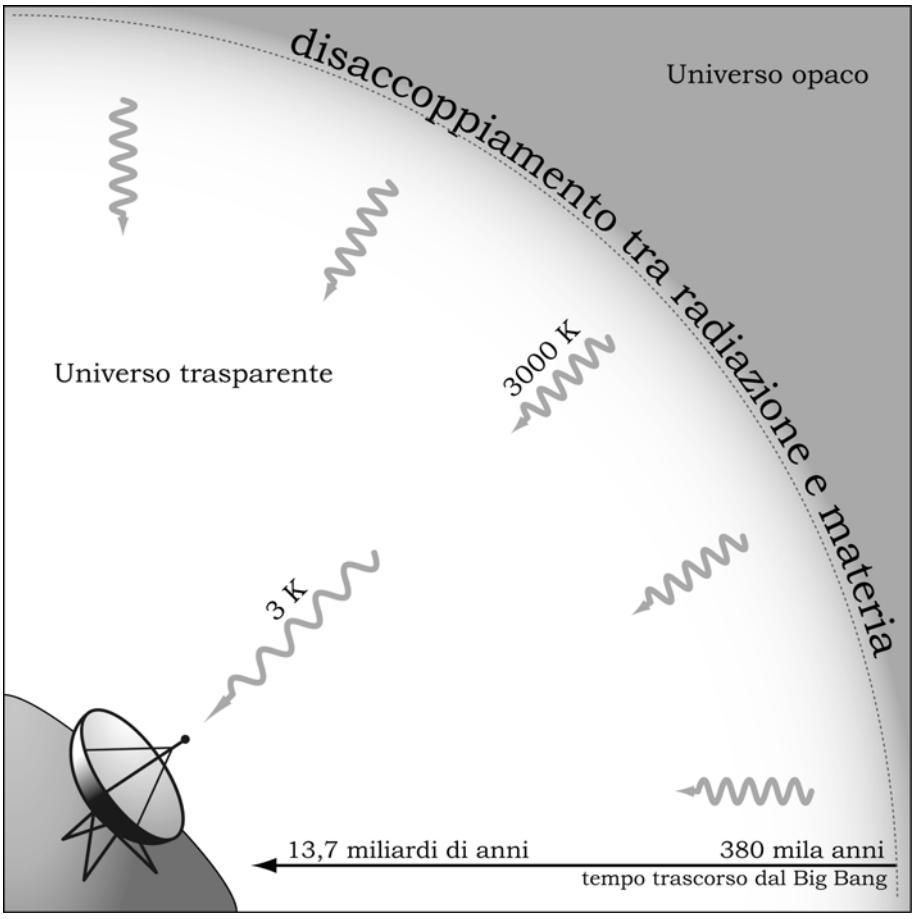



Figura 2.8: La radiazione cosmica di fondo appare provenire da una sfera che ci circonda completamente, e che segna la demarcazione tra un Universo opaco e un Universo trasparente. Il raggio della sfera corrisponde alla distanza percorsa dai fotoni da quando si sono disaccoppiati dalla materia. Durante il percorso, la lunghezza d'onda dei fotoni è aumentata di un fattore mille a causa dell'espansione dell'Universo.

## Rumori fuori scena

In molte ricostruzioni storiche, l'avanzamento del sapere scientifico viene rappresentato come un processo costante e lineare: il tale inventa una teoria, un altro fa un esperimento, il risultato dell'esperimento falsifica o non falsifica la teoria, e così via. In

questo quadro idilliaco la scienza procede come un rullo compressore, buttando giù uno dopo l'altro gli ostacoli che separano l'umanità dalla verità, in un susseguirsi di rutilanti scoperte e di traguardi sensazionali. Purtroppo, chi segue l'impresa scientifica dall'interno sa benissimo che le cose non stanno proprio in questo modo. Nella loro partita a scacchi con la natura, quasi mai gli scienziati hanno una chiara visione di quale debba essere la mossa successiva. La strada della scienza è disseminata di false piste, sentieri interrotti, diramazioni prive di segnaletica: e il cammino degli scienziati, più che alla marcia di un condottiero trionfante, spesso assomiglia a quello di un ubriaco che, provando e riprovando, andando di lampione in lampione, cerca la strada di casa.

Nel caso che stiamo per raccontare, quello della accidentale scoperta della radiazione cosmica di fondo, anche questa immagine finisce per essere inadeguata. Il modo in cui si sono svolti gli eventi fa pensare a una di quelle commedie degli equivoci in cui, per divertire lo spettatore, tutto è congeniato in maniera tale da arrivare il più tardi possibile e con il maggior numero di colpi di scena alla soluzione finale, quella che mette tutti d'accordo. Alcuni dei personaggi coinvolti, peraltro, avrebbero avuto tutte le carte in regola per essere i protagonisti di un film dell'epoca d'oro di Hollywood. Allora, cerchiamo di immaginarcelo, questo film.

Buio in sala. Sipario.

Il primo a entrare in scena è un fisico, ma è anche un sacerdote: Georges Henri Lemaître. Uno studioso belga, brillante e serissimo, che, nel 1927, riscopre autonomamente la soluzione di Universo in espansione che Alexander Friedmann aveva trovato qualche anno prima. Non solo, ma ci aggiunge parecchio del suo, facendo i primi tentativi seri di comprendere cosa debba accadere al contenuto di un Universo in espansione, e arrivando a considerare il ruolo che doveva giocare la radiazione nell'Universo primordiale.

Secondo Lemaître, l'Universo denso e compatto degli istanti iniziali doveva essere qualcosa di simile a una specie di grosso atomo (che egli battezzò appunto *atomo primordiale*) dal cui improvviso decadimento ebbe origine tutta la materia presente nell'Universo. Con un'immagine poetica, Lemaître descrive l'e-

voluzione dell'Universo come "uno spettacolo di fuochi d'artificio appena terminato" in cui è possibile avvertire "ancora qualche piccola esplosione, cenere, nuvole di fumo": una visione che sembra evocare l'idea di una radiazione di fondo residua. Per qualche ragione, chissà, magari anche per via dell'abito che indossa, le teorie di Lemaître non vengono prese molto sul serio dalla comunità scientifica, in primo luogo da Einstein che le liquida come "abominevoli". Tra i pochi a degnare di qualche considerazione le idee del belga, c'è il grande scienziato inglese Sir Arthur Eddington che, pur non essendo un sostenitore del modello di Universo in espansione ("mi fa raggelare"), nel 1931 fa ristampare in inglese i lavori scientifici di Lemaître per dare loro una diffusione più ampia.

Passa oltre un decennio ed entra in scena un secondo personaggio: George Gamow. Il profilo di Gamow è di tipo del tutto diverso da quello di Lemaître. Gamow è un ucraino fuggito dalla dittatura sovietica e rifugiatosi negli Stati Uniti. Un carattere eccentrico, espansivo, abbastanza fuori dagli schemi anche per un ambiente non molto attento alle formalità come quello dei fisici. Gamow non passa facilmente inosservato: gira su una Cadillac rosa decappottabile, ama giocare pesante e apprezza parecchio i Martini. Da giovane, in Russia, ha seguito i corsi universitari tenuti da Friedmann, e ne ha ereditato la passione per il modello di Universo in espansione.

Gamow è sicuramente una mente geniale, per quanto non convenzionale. Tra un Martini e l'altro, insieme a un giovane collaboratore, Ralph Alpher, si mette a studiare la possibilità che la formazione degli atomi più semplici sia avvenuta nell'Universo delle origini, ovvero affronta per la prima volta il problema della nucleosintesi primordiale. Il tentativo ha successo, e nel 1948 il lavoro intitolato "L'origine degli elementi chimici" viene accettato dalla rivista *Physical Review*. La data di pubblicazione prevista è il $1^o$ aprile, e Gamow non sa resistere alla tentazione di perpetrare uno dei suoi celebri scherzi: include il fisico Hans Bethe tra gli autori, al solo scopo di ottenere il terzetto Alpher, Bethe, Gamow, che suona come le prime tre lettere dell'alfabeto greco: alfa, beta, gamma.

Più tardi, lavorando insieme a un altro giovane studioso, Robert Herman, Alpher si rende conto che la formazione dei nuclei

atomici nell'Universo primordiale doveva necessariamente implicare la presenza di un'enorme quantità di radiazione, e che questa radiazione non poteva essere svanita nel nulla, ma doveva aver lasciato un residuo nell'Universo attuale. È la prima chiara previsione dell'esistenza della radiazione cosmica di fondo. Tra il 1948 e il 1950, Gamow, Alpher e Herman pubblicano diversi articoli scientifici sulla teoria della radiazione primordiale, dando di volta in volta stime abbastanza diverse su quale debba essere la temperatura dei fotoni nell'Universo attuale; ma, in un contributo apparso nel 1950 su *Physics Today*, Gamow, senza peraltro dare molte spiegazioni al riguardo, tira fuori dal cilindro un numero profetico: 3 K.

I calcoli di Gamow, Alpher ed Herman passano pressoché inosservati. Non va sottovaluto il fatto che, negli anni cinquanta del XX secolo, la maggior parte dei fisici non ritiene la cosmologia un'occupazione seria. Le stranezze del personaggio Gamow (tra le cui "colpe" va anche ascritta la pubblicazione di libri divulgativi di fisica, fortemente pervasi dallo spirito scanzonato dell'autore) sono un'aggravante, e non ispirano certo molti studiosi a investire il proprio tempo su faticose ricerche per mettere alla prova i suoi calcoli.

*Flashback*. Nel 1941, alcuni studiosi che misurano le caratteristiche delle molecole atomiche presenti nello spazio interstellare, notano che le molecole di cianogeno (composte da un atomo di azoto e da uno di carbonio) si comportano come se fossero immerse in una radiazione termica con una temperatura di circa 3 K. Nessuno sembra essere sfiorato dal sospetto che le molecole siano davvero immerse in una radiazione del genere. In un libro del 1950, il premio Nobel Gerhard Herzberg calcola che la temperatura dovrebbe essere di 2,3 K, aggiungendo che "naturalmente questo fatto non ha un grande significato".

Andiamo avanti. Siamo nel maggio del 1964. Sulle colline di Holmdel, nel New Jersey, due radioastronomi americani, Arno Penzias e Robert Wilson, hanno deciso di usare una sofisticata antenna radio di 6 metri, di proprietà dei laboratori Bell, costruita originariamente per ricevere le trasmissioni di uno dei primi satelliti per telecomunicazioni. Penzias e Wilson vorrebbero riadattare l'antenna per effettuare osservazioni di radioastronomia, ma, per poter ottenere misure accurate, devono prima cerca-

re di capire quale sia il livello di rumore interno dell'apparato, in modo da poterlo sottrarre dai loro dati. Curiosamente, dopo aver misurato tutti i contributi spuri e averli sottratti, si rendono conto che il loro rivelatore continua a captare qualcosa, per quanto di debolissima intensità, qualunque sia la direzione di puntamento. I due non possono far altro che attribuire questo sommesso borbottìo a un eccesso di rumore dell'antenna. Fatti i dovuti calcoli, traducono il rumore misurato nella temperatura che dovrebbe avere un corpo nero per emettere quel livello di radiazione. Il risultato è un valore compreso tra 2,5 K e 4,5 K. A questo punto, Penzias e Wilson si rimboccano le maniche e iniziano a lavorare sull'antenna per eliminare il fastidioso ronzìo.

Ancora un *flashback*. Nella primavera del 1964, due fisici sovietici, Andrei Doroshkevich e Igor Novikov, hanno pubblicato un articolo che ipotizza, per la prima volta, la possibilità di misurare la radiazione fossile prevista da Gamow, Alpher e Herman. I due fanno anche riferimento a un rapporto tecnico, scritto nel 1961 dall'ingegner Edward Ohm, riguardante il funzionamento di un'antenna di 6 metri costruita dai laboratori Bell. È proprio l'antenna di Holmdel che avrebbe fatto dannare Penzias e Wilson. Secondo Doroshkevich e Novikov, l'antenna dei laboratori Bell sarebbe lo strumento ideale per provare a rivelare la presenza del fondo di radiazione. Ma dal momento che, a quanto pare, l'antenna non ha ancora rivelato niente del genere, i due fisici concludono che il modello del Big Bang ha qualcosa che non va. Purtroppo, i sovietici hanno frainteso le misurazioni riportate da Ohm, che invece aveva davvero trovato qualcosa di strano nel rumore dell'antenna (indovinate: un eccesso di rumore di circa 3 K) ma non gli aveva dato troppo peso. Comunque, in ossequio a una consolidata tradizione per cui qualsiasi scoperta è già stata fatta diversi anni prima da uno scienziato russo ma nessuno l'ha mai saputo, l'articolo di Doroshkevich e Novikov viene completamente ignorato dalla comunità internazionale (inclusi ovviamente proprio coloro che dovranno usare l'antenna in questione, ovvero Penzias e Wilson).

Stacco. Si torna a Holmdel, New Jersey. Siamo alla fine del 1964. Penzias e Wilson hanno lavorato come matti per mesi, per capire il motivo dell'eccesso di rumore della loro antenna. In qualunque parte del cielo puntino il congegno, i risultati sono

gli stessi. Nonostante abbiano ispezionato l'apparato da cima a fondo non riescono a trovare l'origine del rumore. Sono arrivati al punto di rimuovere con le proprie mani "un materiale dielettrico bianco" (parole loro) che alcuni piccioni hanno depositato nella loro antenna. Senza risultato. La sequenza in cui Penzias e Wilson si affannano a ripulire la loro antenna dal guano dei volatili (che verranno infine giustiziati per impedire loro di ripetere lo scempio) è il culmine comico della pellicola.

Spostiamoci di poche decine di chilometri, e andiamo a Princeton. Qui lavora il *"dream team"* dell'epoca in fatto di ricerche cosmologiche: Robert Dicke, James Peebles, Peter Roll e David Wilkinson. Dicke è uno dei più brillanti scienziati dell'epoca: abile sia dal punto di vista teorico che sperimentale, ha tra le altre cose contribuito anni prima all'invenzione del radar (pare anche sia stato il primo a importare negli Stati Uniti la penna a sfera, sebbene tenderei a non ascrivere questo fatto tra i suoi meriti scientifici). Roll e Wilkinson sono due giovani esperti di strumentazione radio. Peebles è un promettente fisico teorico. Su incitamento di Dicke, Peebles ha compiuto calcoli dettagliati per studiare il comportamento della radiazione in un Universo in espansione. Partendo da presupposti diversi, ha ottenuto, del tutto indipendentemente, conclusioni simili a quelle di Gamow, Alpher e Herman. Intanto, Roll e Wilkinson stanno costruendo, sul tetto di uno dei laboratori di fisica di Princeton, una piccola antenna per catturare i fotoni primordiali previsti dai calcoli di Peebles.

Siamo a Princeton, Stati Uniti d'America.

Questi ricercatori sono il meglio che il mercato può offrire sia dal punto di vista teorico che sperimentale.

Sanno quello che cercano e sanno quello che fanno.

Questi sono quelli che faranno la scoperta.

Questi sono quelli che cambieranno il corso della scienza.

Neanche per idea.

Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson brancolano nel buio. Il loro dispositivo non è ancora pronto. Inoltre, secondo i calcoli di Peebles la temperatura della radiazione di fondo dovrebbe essere intorno ai 10 K. Probabilmente, quindi, anche se fosse pronta, l'antenna di Princeton cercherebbe alla frequenza sbagliata. L'antenna giusta alla frequenza giusta ce l'hanno, bell'e pronta,

Penzias e Wilson, che stanno qualche decina di chilometri più in là ma non sanno cosa cercare. Per un ennesimo paradosso di questa storia, l'apparecchio che Penzias e Wilson stanno usando per misurare l'intensità della radiazione catturata dalla loro antenna, il *radiometro*, era stato ideato negli anni quaranta proprio da Robert Dicke.

Gennaio 1965. Un Penzias al colmo della frustrazione si sfoga con un ricercatore del MIT, Bernard Burke. Gli racconta dell'eccesso di rumore della loro antenna e dei mesi passati a cercare di capirne il motivo. Burke gli dice di aver sentito da un altro collega, Ken Turner, che un certo James Peebles aveva tenuto un seminario in cui si parlava di una radiazione di corpo nero di pochi gradi sopra lo zero assoluto che dovrebbe pervadere l'Universo. È la svolta.

Penzias chiama al telefono Dicke. Dopo aver riagganciato, Dicke guarda Peebles, Roll e Wilkinson e dice, più o meno: "Ragazzi, ci hanno fregato". Il gruppo di Princeton sale in macchina e raggiunge Holmdel. I quattro parlano con Penzias e Wilson, visitano l'apparato, controllano i dati, e si convincono che l'antenna ha in effetti captato i fotoni primordiali. Nel maggio del 1965 un articolo di Penzias e Wilson su *The Astrophysical Journal* annuncia la "misura di un eccesso di temperatura" di 3,5 K. Senza sbilanciarsi in interpretazioni cosmologiche, Penzias e Wilson rimandano per una "possibile spiegazione dell'eccesso di rumore osservato" a un articolo che compare sullo stesso numero della rivista, nel quale Dicke, Peebles, Roll e Wilkinson espongono la teoria della radiazione cosmica di fondo.

La scena finale, accompagnata da musica trionfale, mostra Penzias e Wilson che, nel 1978, ricevono il premio Nobel per la fisica "per la loro scoperta della radiazione cosmica di fondo nelle microonde".

Titoli di coda.

## Una prova scottante

La scoperta di Penzias e Wilson è una vera pietra miliare nella storia della cosmologia, simile a quella della legge di espansione dell'Universo compiuta da Hubble circa quarant'anni prima. In

un certo senso, fu proprio il 1964 il vero spartiacque tra la fase "ingenua" e pionieristica della ricerca cosmologica e la nascita di una vera e propria disciplina osservativa. Fino ad allora, erano stati ben pochi quelli che avevano messo a rischio la riuscita della propria carriera scientifica avventurandosi in un campo in cui scarseggiavano persino i presupposti per fare scienza. Subito dopo che l'antenna di Holmdel ebbe captato il calore residuo proveniente dagli istanti iniziali del Cosmo, invece, molti altri ricercatori si diedero da fare per confermare la scoperta, e le osservazioni cominciarono a mostrare con sempre maggiore chiarezza che le caratteristiche spettrali del segnale erano compatibili con quelle di una radiazione di corpo nero. Fu soltanto allora che si giunse alla reale consacrazione del modello cosmologico del Big Bang.

Diciamoci la verità: fino all'inizio degli anni sessanta, i principali propugnatori del modello del Big Bang erano stati fondamentalmente degli emarginati. Gamow, Lemaître, Friedmann, erano persone che avevano vissuto più o meno ai margini della comunità scientifica, occupandosi di una ricerca che veniva considerata tutt'altro che seria e rispettabile dalla maggior parte degli studiosi importanti. La lista dei commenti scherzosi, denigratori, o addirittura apertamente offensivi, accumulatisi prima del 1964 nei confronti della cosmologia in generale, e del modello del Big Bang in particolare, potrebbe probabilmente riempire alcune pagine.[2]

Il modello del Big Bang doveva inoltre ormai confrontarsi con un rivale temibile, il modello di *stato stazionario* proposto nel 1948 da Fred Hoyle e dai suoi colleghi Hermann Bondi e Thomas Gold. Un modello in cui l'Universo è sempre uguale a se stesso, eterno e fondamentalmente immutabile. Un Cosmo statico, senza evoluzione, senza un fastidioso istante iniziale, e senza una fine. Qualcosa, che la maggior parte degli scienziati riteneva, probabilmente, molto più elegante e appetibile dell'Universo in evoluzione descritto dal modello del Big Bang. Come abbiamo

[2]A titolo di esempio, potremmo citare il premio Nobel William Fowler: "La cosmologia è per lo più il sogno di fanatici che preferiscono una semplificazione eccessiva alle spese di una comprensione profonda"; oppure il celebre fisico Lev Landau: "I cosmologi sono spesso in errore, mai in dubbio".

già detto, lo stesso Einstein aveva avuto un forte pregiudizio in favore di un Universo statico.

Certo, l'osservazione dell'allontanamento delle galassie non si poteva più mettere in discussione, e quindi lo spazio doveva espandersi. Ma per Hoyle e i sostenitori dello stato stazionario questo non era un grosso problema. Per compensare la diminuzione di densità dell'Universo causata dall'espansione sarebbe stata sufficiente la continua creazione dal nulla di una minuscola quantità di materia, qualcosa di talmente piccolo da essere essenzialmente impossibile da osservare: una manciata di atomi ogni anno, in un volume simile a quello della nostra galassia.

In qualche modo, atomi che compaiono costantemente dal cilindro in punti casuali dello spazio sembravano per molti un boccone più facile da digerire di un Universo che evolve da uno stato di densità altissima, mutando nel corso del tempo. Comunque, la scienza si basa sulla falsificazione dei modelli attraverso il metodo sperimentale, e la presenza di teorie rivali è sempre ben accetta; anzi, in qualche modo, necessaria. Fino all'inizio degli anni sessanta nessuna osservazione empirica era stata però in grado di proclamare un chiaro vincitore tra i due modelli cosmologici.

L'arbitro che decretò la sconfitta del modello dello stato stazionario nei confronti del modello del Big Bang fu il crepitìo tenacemente inseguito dal gruppo di Princenton e involontariamente captato dall'antenna di Penzias e Wilson sulla collina di Holmdel. Il vagito dell'Universo appena nato fu un suono sgradevole per Hoyle, Bondi e Gold, ma fu musica per le orecchie dei (pochi) sostenitori del modello di Universo in evoluzione. (È singolare osservare come persino lo stesso Wilson, essendo stato allievo di Hoyle, avesse una certa predilezione per il modello dello stato stazionario.) Se l'Universo era stato per l'eternità esattamente così come lo osserviamo oggi, non c'era alcun modo di spiegare la presenza di una radiazione di corpo nero diffusa in ogni punto dello spazio. Solo se l'Universo aveva attraversato una fase calda e densa, in cui la materia e la radiazione erano state accoppiate in un unico plasma incandescente, poteva essere rimasto ovunque un eccesso di calore, una traccia simile a quella rivelata per la prima volta dall'apparato di Penzias e Wilson.

Il moto di recessione delle galassie, la spiegazione delle ab-

bondanze degli elementi leggeri e, soprattutto, la presenza di un fondo di radiazione di corpo nero, erano tre indizi inoppugnabili a favore del modello del Big Bang. Alla fine degli anni sessanta, la cosmologia cominciava quindi ad avere un modello che descriveva a grandi linee, in un modo ancora sommario ma da cui sembrava emergere un quadro coerente, lo stato passato e presente del nostro Universo. Mancavano però ancora parecchi dettagli, e non erano dettagli da poco.

# ·3·

# SEMI COSMICI

*Ma poiché, tuttavia, la verità e la natura delle cose lo impongono, presta attenzione, finché dimostriamo, in pochi versi, che esistono cose costituite di corpo solido ed eterno, che noi mostriamo essere i semi delle cose e i primi principi da cui fu creato tutto l'Universo quale ora è costituito.*

Lucrezio, *De rerum natura*

Nell'Universo, si stima, ci sono all'incirca un centinaio di miliardi di galassie simili alla nostra. Ognuna contiene circa cento miliardi di stelle. Quasi tutte le galassie sono legate gravitazionalmente ad altre galassie, formando gruppi di decine di galassie, o veri e propri "ammassi" di centinaia o migliaia di galassie.

Sono pensieri che fanno girare la testa...

L'Universo attuale è tutt'altro che semplice. I pianeti, le stelle, le galassie, in fondo anche la nostra stessa esistenza, sono una testimonianza dell'estrema complessità raggiunta dal Cosmo nel corso della sua lunga evoluzione.

Ma l'Universo primordiale, come abbiamo visto, era molto semplice. Talmente semplice che riusciamo a descriverne le proprietà complessive con una manciata di equazioni; e queste equazioni ci danno la possibilità di fare previsioni che, come nel caso della scoperta della radiazione cosmica di fondo, si rivelano sorprendentemente aderenti alla realtà. Sorge allora la domanda: come si è passati dall'estrema semplicità dell'Universo primordiale all'estrema complessità di quello attuale?

Questa domanda ha tanti aspetti. Potrebbe riguardare ad esempio la formazione delle stelle, o dei sistemi planetari, o della vita stessa. Per il cosmologo, la questione si pone in maniera diversa, apparentemente meno ambiziosa, ma in realtà fondamentale anche per capire la nostra stessa connessione con il resto dell'Universo. Il cosmologo vuole capire come si siano potute formare le più grandi strutture osservate, diciamo a partire dalle galassie in su. La semplice cornice fornita dal modello del Big Bang è una validissima descrizione delle proprietà medie dell'Universo, ma non è in grado, da sola, di dare una risposta al problema dell'emergere di queste gigantesche aggregazioni di materia. Bisogna dunque fare ricorso a nuovi ingredienti: alcuni di essi sono stati introdotti soltanto negli ultimi venti anni circa, e hanno iniziato a mostrare la loro reale validità solo in tempi ancora più recenti.

## Instabilità

In natura esistono quattro forze fondamentali, alle quali i fisici riconducono tutte le interazioni che avvengono tra i componenti materiali dell'Universo. Della forza più familiare, quella gravitazionale, abbiamo già parlato a lungo. Essa è responsabile tanto della caduta dei corpi sulla Terra, che del moto dei corpi celesti o delle proprietà dello spaziotempo sulle distanze cosmiche. C'è poi la *forza elettromagnetica*, della quale sperimentiamo le conseguenze ogni volta che usiamo una radio, una calamita, una lampadina. Le onde elettromagnetiche di cui abbiamo parlato in abbondanza nel capitolo precedente sono manifestazioni di questa forza. Esistono infine altre due forze, di cui abbiamo poca esperienza nella vita di tutti i giorni: la *forza nucleare forte* e la *forza nucleare debole*, che hanno a che fare con i fenomeni che avvengono su scale piccolissime, essenzialmente all'interno dei nuclei atomici. Nel capitolo precedente abbiamo accennato al fatto che la forza nucleare forte mantiene impacchettati i protoni all'interno dei nuclei atomici. La forza nucleare debole è invece responsabile del decadimento delle sostanze radioattive.

Nell'Universo primordiale, in epoche molto prossime al Big Bang, tutte le forze fondamentali giocavano un ruolo egualmente

importante. La radiazione elettromagnetica interagiva frequentemente con la materia allo stato di plasma, e le reazioni nucleari sono state essenziali, ad esempio, per la formazione dei nuclei leggeri. Nelle fasi più recenti della storia dell'Universo, invece, ogni forza si è gradualmente ritagliata un proprio particolare campo di azione. Per la cosmologia, interessata principalmente al comportamento dell'Universo nel suo complesso, e al modo in cui la materia si distribuisce sulle scale più grandi, le cose sono diventate, in un certo senso, più semplici. Per studiare il Cosmo in epoche successive alla ricombinazione, infatti, i cosmologi possono tralasciare gli effetti della forza elettromagnetica e delle forze nucleari, e occuparsi essenzialmente della sola forza di gravità. La ragione di questo fatto risiede nella natura stessa delle quattro forze fondamentali.

La forza di gravità è una forza molto debole. Se prendete in mano due oggetti qualsiasi, non riuscirete a percepire l'effetto della loro attrazione gravitazionale. Per avere un'idea della debolezza della forza di gravità, pensate a quanto deve essere grande la massa della Terra per poter esercitare un'attrazione rilevante sugli oggetti che abbiamo intorno e sui nostri stessi corpi. A confronto, la forza elettromagnetica è molto più potente: basta un comune magnete per far alzare in aria un piccolo oggetto metallico, e una buona elettrocalamita può facilmente sollevare da terra un oggetto pesante come un'automobile.

A causa della sua intrinseca debolezza, la forza di gravità è totalmente irrilevante nella descrizione dei fenomeni che avvengono su scale microscopiche, dove le masse coinvolte hanno valori minuscoli. Se poteste tenere un elettrone in ciascuna mano, la repulsione elettrica tra le due particelle (dovuta al fatto che esse hanno una carica dello stesso segno) sarebbe immensamente più forte della loro attrazione gravitazionale: circa un milione di miliardi di miliardi di miliardi di miliardi ($10^{42}$) di volte più forte. La forza nucleare forte è, a sua volta, circa 100 volte più forte di quella elettromagnetica, anche se ha effetto solo a distanze piccolissime (come abbiamo visto quando abbiamo accennato alla fusione nucleare). La forza nucleare debole è circa 100 mila volte meno efficace di quella forte.

La fiacca forza di gravità la fa però da padrona man mano che le distanze in gioco diventano più grandi. La forza di gravità

riesce a trionfare sulla forza elettromagnetica, che pure la surclassa in quanto a capacità di interazione, perché essa è soltanto attrattiva. Non esiste né una carica gravitazionale (cioè una massa) negativa, né una gravità repulsiva (anche se nel seguito di questo libro vedremo che questo fatto potrebbe avere delle eccezioni). Al contrario, le cariche elettriche sono sia positive che negative: nell'Universo se ne trovano in egual numero e, in media, i loro effetti finiscono per bilanciarsi. Mentre la materia è, in condizioni normali, assolutamente neutra dal punto di vista elettromagnetico (perché gli atomi che la compongono hanno lo stesso numero di elettroni e protoni) essa non lo è mai dal punto di vista gravitazionale. La gravità agisce piano, ma i suoi effetti si accumulano inesorabilmente e, come abbiamo visto, arrivano persino a plasmare la struttura geometrica dell'intero Universo. Nelle stelle, le forze nucleari riescono, per miliardi di anni, a bilanciare l'effetto della gravità, opponendosi al collasso della materia attraverso l'energia rilasciata dai processi di fusione dei nuclei atomici. Alla fine della vita di una stella, anche questo equilibrio precario viene infranto, e la gravità ne esce trionfante. Su scale ancora più grandi, la forza gravitazionale vince la partita ancora prima di iniziarla.

Nella maggior parte dei fenomeni che avvengono su scale di interesse cosmologico, dunque, la gravità agisce in modo calmo ma irresistibile. Come la neve si incolla piano piano intorno a un sassolino che rotola lungo un dirupo innevato, creando con il passare del tempo una palla di neve sempre più grande che finisce per diventare una valanga, così la materia disseminata nel Cosmo avverte l'attrazione di altra materia, non importa quanto lontana, e si aggrega in maniera sempre più efficace con il passare del tempo. Qualsiasi massa chiama altra massa: un iniziale concentrato di materia diventa dunque sempre più grande, aggregando intorno a sé ancora più massa, e via di questo passo.

La capacità della gravità di portare la materia ad autoaddensarsi su scale enormi è straordinaria. Ogni accumulo di materia che osserviamo nell'Universo, dai pianeti, alle stelle, alle galassie, via via fino alle più immense strutture esistenti, è sorto per effetto di lunghi periodi di accrescimento dovuti alla instancabile azione della gravità. Questo quadro, che si basa su un

meccanismo detto di *instabilità gravitazionale*, sembra fornire una spiegazione incredibilmente soddisfacente del modo in cui si sono formate le strutture che oggi osserviamo nell'Universo. Non importa quanto immense esse siano: la gravità ha avuto a disposizione un tempo enorme, miliardi e miliardi di anni, per fare il suo lavoro. Manca però un dettaglio fondamentale. Non possiamo creare una valanga senza partire da un sassolino.

Finora, abbiamo sempre considerato l'Universo primordiale qualcosa di molto semplice, un brodo uniforme di plasma incandescente e radiazione. Ma se la materia fosse stata distribuita in modo completamente uniforme nell'Universo primordiale, la gravità non avrebbe mai avuto modo di rompere questa uniformità e iniziare a creare degli addensamenti. Se ci si pensa bene, è chiaro che debba essere così: perché la materia dovrebbe scegliere di addensarsi in un certo punto dello spazio piuttosto che in un altro, se la densità è la stessa in tutti i punti? Ci vuole qualcosa che alteri, anche solo impercettibilmente, una situazione di equilibrio perfetto: in questo caso, la materia comincerà a spostarsi piano piano verso il punto dove ha avuto origine la disuniformità, e chiamerà a sé sempre più materia.

È come quando ci si trova in una grande stanza molto affollata. In mancanza di centri particolari di interesse, la gente tenderà a distribuirsi occupando tutto lo spazio disponibile in maniera uniforme, e ciascuno continuerà a mantenere più o meno la sua posizione. Ma se si forma un disturbo, per esempio un capannello anche di poche persone, potete scommetterci che esso continuerà a crescere attirando altra gente dai vari angoli della stanza, fino a formare un unico grosso capannello in un posto ben localizzato. Non abbiamo scelta: per consentire alla forza di gravità di iniziare il suo lavoro, dobbiamo ipotizzare un Universo primordiale disseminato di lievi imperfezioni, piccole alterazioni nel modo in cui la materia era distribuita, ovvero delle *perturbazioni di densità*. L'incredibile varietà di strutture cosmiche che oggi possiamo osservare deve aver avuto origine da una situazione di quasi completa omogeneità, alterata dalla presenza di piccoli "semi cosmici" sparsi in maniera casuale nell'Universo primordiale. Quello che ci sembra molto semplice e uniforme doveva già contenere in sé, in maniera strisciante, il germe della complessità: dopo il Big Bang, le cose erano un po'

meno lisce di quello che immaginiamo.

## Tutto liscio (o quasi)

Nelle prime righe dell'articolo del 1965 in cui riportavano l'eccesso di temperatura misurato dall'antenna di Holmdel, Penzias e Wilson affermavano che "questo eccesso di temperatura è, entro i limiti della nostra osservazione, isotropo". Come avremo modo di vedere, in questa breve frase si nasconde uno dei problemi più duri che la moderna cosmologia abbia mai dovuto affrontare. Abbiamo già detto che il termine *isotropo* si riferisce alle proprietà fisiche che non dipendono dalla direzione: una sfera di cristallo perfettamente liscia è isotropa, perché da qualunque parte la si rigiri appare esattamente la stessa. La frase citata, quindi, significa semplicemente che l'eccesso di temperatura misurato da Penzias e Wilson non dipendeva dalla direzione in cui essi puntavano la loro antenna. Siccome la radiazione cosmica di fondo proveniente da diverse direzioni del cielo è partita da diverse regioni dell'Universo al momento del disaccoppiamento tra radiazione e materia, la conclusione che dobbiamo trarre dall'isotropia osservata da Penzias e Wilson è che le condizioni fisiche dell'Universo primordiale dovevano essere molto simili in ogni suo punto.

Questa è, per molti versi, una buona notizia. Se l'Universo primordiale fosse stato molto disomogeneo, con proprietà estremamente variabili da regione a regione, le speranze di comprenderlo sarebbero molto ridotte. Il modello del Big Bang si basa sul principio cosmologico, cioè sull'assunzione che in media le proprietà dell'Universo siano le stesse in ogni punto e in ogni direzione. Se Penzias e Wilson avessero rivelato profonde differenze nelle proprietà della radiazione di fondo, i cosmologi sarebbero stati costretti a rivedere in maniera profonda le loro idee sull'Universo.

Allo stesso tempo, però, il fatto che la radiazione cosmica di fondo sia così liscia fa scattare un campanello di allarme: se un qualche tipo di disuniformità doveva essere presente nell'Universo primordiale per dare conto della successiva formazione delle strutture cosmiche per effetto della gravità, perché la radia-

zione di fondo ci appare uniforme? Non dovremmo forse aspettarci che, a qualche livello, la radiazione di fondo sia *anisotropa* (cioè non isotropa)?

Abbiamo visto che, prima della ricombinazione, la materia e la radiazione erano strettamente legate tra loro, così legate che non è nemmeno possibile trattarle come due entità separate, ma bisogna considerarle una sorta di unico fluido. Di fatto, prima del disaccoppiamento dalla materia, i fotoni erano segregati negli interstizi del plasma primordiale, costretti a rimbalzare freneticamente tra un elettrone e l'altro. La materia e la radiazione erano avviluppate in uno stretto abbraccio, e si seguivano l'un l'altra come una coppia di affiatati ballerini. Al momento della ricombinazione, però, le cose cambiarono. Dopo un ultimo giro di valzer, fotoni e atomi si dissero addio e le loro strade si separarono per sempre. Ma la traccia dell'antico legame tra radiazione e materia, ormai infranto per sempre, è indelebile. Qualsiasi perturbazione presente nella materia al momento del disaccoppiamento deve essere rimasta per sempre impressa nella radiazione.

Esistono tre modi in cui le perturbazioni presenti nell'Universo al momento del disaccoppiamento possono aver stampato il loro marchio nella radiazione cosmica di fondo. Il primo, il più semplice da comprendere, è causato dal forte legame tra radiazione e materia: se in una certa regione dello spazio il plasma era più denso rispetto alla media, nello stesso volume dovevano esserci anche un po' più di fotoni, essendo questi ultimi "intrappolati" tra le particelle cariche. Siccome la densità di fotoni in un corpo nero è strettamente legata alla temperatura, la radiazione di fondo apparirà un po' più calda[1] se è partita da una zona dell'Universo che era un po' più densa della media, e viceversa.

Il secondo modo tira in ballo la teoria della gravitazione di Einstein: la presenza di un eccesso di materia in un punto dell'Universo altera la curvatura dello spaziotempo in quel punto rispetto ai punti circostanti, ossia crea una perturbazione nel campo gravitazionale. Possiamo visualizzare la curvatura asso-

[1] Qui e nel seguito, l'aggettivo "calda" (o "fredda") applicato alla radiazione cosmica di fondo deve interpretarsi come riferito alla temperatura del corpo nero corrispondente: è, cioè, un modo semplificato per dire che la radiazione appare quella di un corpo nero a temperatura più alta o più bassa della media.

ciata alla perturbazione come una "buchetta", un avvallamento nello spaziotempo. I fotoni che al momento del disaccoppiamento si trovavano in fondo a una buca, cioè all'interno della regione perturbata, hanno dovuto spendere più energia per risalire le pareti e allontanarsi, rispetto ai loro compagni che si trovavano di fuori. Una perdita di energia dei fotoni, ricordiamolo, si traduce in una diminuzione della loro frequenza e in un aumento della loro lunghezza d'onda. I fotoni che hanno lasciato una zona in cui la densità era superiore alla media hanno quindi subito uno spostamento verso il rosso (questo fenomeno è chiamato infatti *redshift gravitazionale*). La radiazione proveniente da queste regioni dell'Universo sembrerà più fredda della media. Bisogna tenere presente che può essere avvenuto anche l'opposto: i fotoni hanno acquistato energia (e la radiazione apparirà quindi più calda) se si sono trovati a lasciare una zona meno densa della media, perché in questo caso sono "scivolati" giù da una collina, una protuberanza dello spaziotempo. Come si sarà notato, il meccanismo appena descritto va in direzione contraria a quello esposto poco fa (in cui zone più dense corrispondevano a temperature maggiori). Tuttavia, quando si calcolano in modo accurato i contributi dei due effetti, si trova che essi si cancellano a vicenda solo parzialmente: il risultato netto è sempre una deviazione dalla temperatura media della radiazione.

Infine, bisogna anche considerare che l'esistenza di perturbazioni nel plasma primordiale faceva sì che la materia tendesse a spostarsi dalle zone meno dense verso le zone più dense, provocando dei flussi di particelle da una regione all'altra dell'Universo. Abbiamo visto che i fotoni emessi da una sorgente in movimento subiscono una variazione di energia, che viene spiegata tramite l'effetto Doppler. A seconda della direzione in cui si muoveva la materia nel punto da cui è partita la radiazione, questa avrà subito una variazione, in un senso o nell'altro, della lunghezza d'onda, e ci sembrerà perciò più fredda o più calda della media.

I tre fenomeni appena descritti devono aver contribuito, ognuno per la sua parte, a modificare la distribuzione dei fotoni al momento del disaccoppiamento. La presenza di anisotropie nella radiazione cosmica di fondo è quindi inevitabile. Le increspature nella densità di materia presenti nell'Universo primordiale

devono aver lasciato un'impronta nella prima luce del Cosmo, una prova perenne della loro presenza, come un sigillo impresso nella ceralacca. Il loro effetto deve essere visibile oggi sotto forma di minuscole variazioni nella temperatura della radiazione di fondo misurata in punti diversi del cielo. Questo fatto offre la possibilità di ricostruire il modo in cui la materia era distribuita nell'Universo all'epoca della ricombinazione, appena qualche centinaio di migliaia di anni dopo il Big Bang, quando la grande architettura del Cosmo era ancora tutta da fare, e c'erano in giro solo travi portanti e impalcature. Un'opportunità straordinaria, di cui i cosmologi si resero conto quasi immediatamente dopo la scoperta di Penzias e Wilson. Si spalancava una nuova finestra su un mondo completamente inesplorato: era probabilmente l'occasione più ghiotta capitata ai cosmologi da quando la loro scienza era nata, circa quarant'anni prima, con le scoperte di Hubble e di Einstein.

Ma se davvero la radiazione di fondo non può essere perfettamente uniforme, perché allora Penzias e Wilson non avevano osservato alcuna anisotropia? La chiave è contenuta ancora nella frase presa dal loro articolo: la radiazione appariva isotropa "entro i limiti" dell'osservazione. In fisica, qualunque affermazione sulle proprietà di un sistema deve tenere conto dell'accuratezza dello strumento con il quale sono state misurate. Ad esempio, una lastra di metallo può risultare perfettamente liscia al tatto, ma, se usiamo un microscopio, riusciamo ad accorgerci della presenza di minuscole imperfezioni. Nel caso delle misure di Penzias e Wilson, se la variazione della temperatura della radiazione di fondo in punti diversi del cielo fosse stata inferiore a circa un grado Kelvin, la loro antenna non sarebbe stata in grado di accorgersene. Quale sarebbe stata la precisione richiesta per osservare le anisotropie causate dalla presenza dei semi cosmici?

Nel 1967, Rainer Sachs e Arthur Wolfe, e, indipendentemente, Martin Rees e Dennis Sciama, dimostrarono che, se le galassie si sono formate per instabilità gravitazionale, i semi presenti nell'Universo al momento della ricombinazione avrebbero dovuto produrre nel fondo cosmico fluttuazioni di temperatura di circa l'un per cento rispetto alla media. Joseph Silk giunse nello stesso periodo a conclusioni simili. Siccome la tempera-

tura media della radiazione di fondo è di circa 3 gradi sopra lo zero assoluto, questi primi calcoli implicavano che si sarebbero dovute cercare fluttuazioni di temperatura di circa un centesimo di grado. La precisione richiesta per osservare queste deviazioni dall'isotropia era ben lontana da quella ottenibile dall'antenna di Holmdel. Non solo, ma come vedremo più avanti, questi primi calcoli erano fin troppo ottimistici: oggi sappiamo che le fluttuazioni di temperatura causate dalla presenza dei semi cosmici sono in realtà molto più piccole.

All'inizio degli anni settanta, quindi, la tecnologia disponibile non sembrava concedere molte speranze di poter misurare l'anisotropia dovuta alla presenza di perturbazioni nell'Universo primordiale. Tuttavia c'erano altre ragioni che rendevano interessante la ricerca di variazioni nella temperatura della radiazione cosmica di fondo. Una di queste aveva a che fare con la riedizione di un vecchio concetto, che la fisica aveva abbandonato all'inizio del novecento, ma che la scoperta della radiazione di fondo riproponeva in versione aggiornata: l'*etere*.

## I giganti del Cosmo

Gli antichi greci supponevano che una sostanza chiamata etere, una specie di personificazione dello spazio stesso (o dei cieli) pervadesse l'intero Universo. Nel XIX secolo, l'etere fu reintrodotto dai fisici per spiegare la propagazione delle onde luminose nel vuoto, dal momento che si pensava che tutti i fenomeni ondulatori dovessero avere una spiegazione meccanica, ovvero richiedessero una deformazione del mezzo in cui l'onda si propaga. L'etere dei fisici implicava l'esistenza di uno spazio assoluto: ogni moto nell'Universo poteva essere misurato rispetto a questo sistema di riferimento privilegiato e immutabile. Il concetto di etere fu abbandonato dopo che un famoso esperimento, condotto nel 1887 dai fisici Albert Michelson e Edward Morley, non trovò alcuna prova della sua esistenza. La teoria della relatività speciale di Einstein prese il via proprio dal risultato di Michelson e Morley, e portò la fisica a sbarazzarsi definitivamente del concetto di spazio assoluto.

Dopo la scoperta di Penzias e Wilson, però, Dennis Sciama

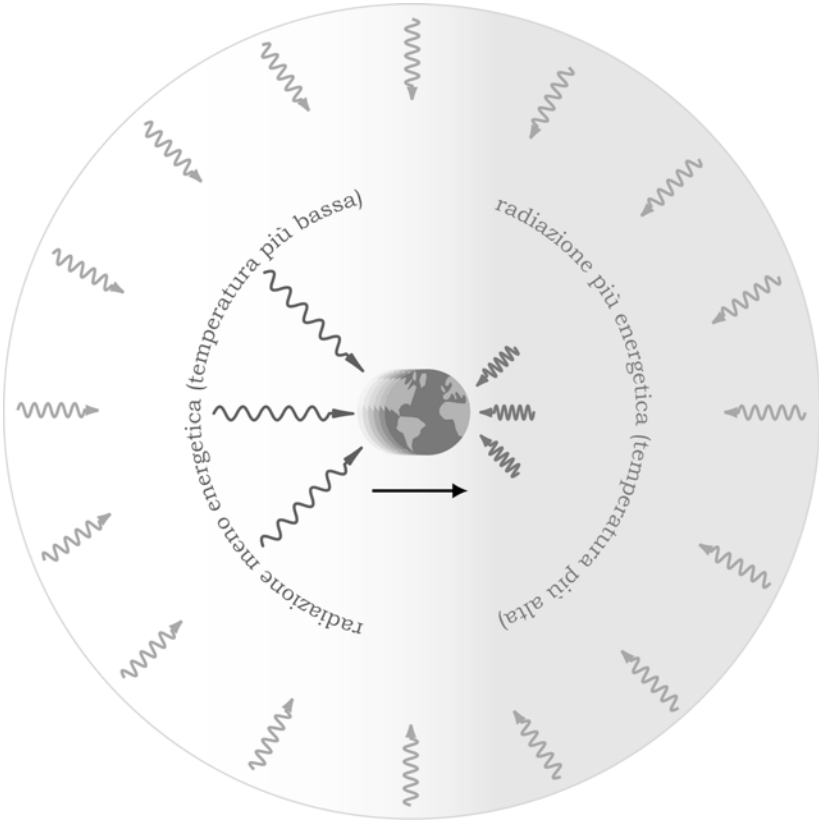



Figura 3.1: A causa dell'effetto Doppler, i fotoni provenienti dalla metà del cielo verso cui viaggia la Terra appariranno più energetici di quelli provenienti dall'altra metà. La radiazione sembrerà quindi più calda in una direzione e più fredda nella direzione opposta.

fece notare come l'esistenza di un mare uniforme di radiazione che permea tutto lo spazio permetta di definire un sistema di riferimento comune rispetto al quale misurare il moto di qualsiasi osservatore nell'Universo[2]. In seguito, James Peebles e David Wilkinson calcolarono cosa dovremmo osservare se ci stessimo muovendo rispetto alla radiazione di fondo. Guardando

[2]Questo fatto non comporta nessuna violazione della teoria della relatività di Einstein e non ha niente a che fare con l'idea newtoniana di uno spazio assoluto. Il sistema di riferimento così definito è semplicemente una convenzione che permette a tutti gli osservatori di accordarsi per misurare il proprio moto.

nella direzione verso cui stiamo andando, la radiazione dovrebbe apparirci più calda; viceversa, guardando nella direzione da cui ci stiamo allontanando, la radiazione dovrebbe apparirci più fredda. Con un'analogia molto imprecisa, potremmo raffigurare quello che avviene immaginando di correre in una fitta pioggia: come le gocce che ci colpiscono frontalmente lo fanno con maggiore violenza di quelle alle nostre spalle, così il nostro moto ci farà sembrare i fotoni del fondo cosmico più o meno energetici a seconda della direzione da cui provengono. In termini più rigorosi, la variazione energetica dei fotoni è dovuta all'effetto Doppler, e questa variazione si traduce in un'anisotropia nella temperatura della radiazione. Questo tipo di anisotropia viene chiamata di *dipolo*, proprio perché è costituita da due poli in direzione opposta, uno più caldo e uno più freddo (figura 3.1).

Secondo questi studi, quindi, l'osservazione dell'anisotropia di dipolo avrebbe potuto fornire un modo per misurare il moto della Terra rispetto a una sorta di "nuovo etere" rappresentato dalla radiazione cosmica di fondo. Il moto di rivoluzione annuale della Terra intorno al Sole avrebbe dato luogo a un'anisotropia di dipolo troppo piccola per essere rivelata dagli strumenti disponibili fino all'inizio degli anni settanta. Ci si aspettava invece di poter osservare il moto che la Terra compie spostandosi insieme al Sole all'interno della Via Lattea. Dai dati a disposizione, si sapeva che questo moto avveniva a una velocità di circa 300 chilometri al secondo. I primi limiti all'esistenza di un'anisotropia di dipolo furono posti da David Wilkinson e da Bruce Partridge nel 1967: nel 1969 Edward Conklin trovò la prima evidenza di un'anisotropia di dipolo dovuta al moto terrestre, cosa che fu confermata da Paul Henry nel 1971. Queste misure erano tuttavia ancora affette da forti incertezze.

Misure più accurate dell'anisotropia di dipolo vennero ottenute solo verso la fine degli anni settanta, da Brian Corey e David Wilkinson, e da un gruppo di ricercatori guidato da un giovane cosmologo dell'Università di Berkeley in California, George Smoot. Smoot e i suoi collaboratori prepararono dei *radiometri differenziali*, ovvero dei rivelatori costruiti in modo da poter rivelare differenze di temperatura nella radiazione di fondo proveniente da diversi punti del cielo. Poi li montarono su alcuni vecchi U2 (non il gruppo rock, ma gli aerei spia americani de-

gli anni cinquanta, costruiti per volare nelle zone più esterne dell'atmosfera terrestre) che la NASA aveva ottenuto per poterli riutilizzare a scopo scientifico. L'apparato così allestito era in grado di misurare variazioni di temperatura dell'ordine di pochi millesimi di grado Kelvin.

Data questa sensibilità, Smoot era certo di poter rivelare la presenza di un'anisotropia di dipolo dovuta al moto del Sole nella Via Lattea. Egli era quindi interessato soprattutto a verificare se esistesse un'anisotropia di dipolo causata da fenomeni completamente diversi, ad esempio quella dovuta a un'eventuale rotazione dell'Universo, oppure al fatto che l'espansione avvenisse in maniera asimmetrica, cioè che l'Universo si espandesse più velocemente in una direzione rispetto alle altre.

I dati raccolti non mostrarono alcuna traccia di questi effetti, ma rivelarono una cosa altrettanto sorprendente: l'anisotropia di dipolo mostrava che la Terra si muoveva in effetti a circa 300 chilometri al secondo, ma nella direzione opposta a quella prevista. Smoot e i suoi collaboratori si resero conto ben presto che l'unica possibile spiegazione per questo risultato inatteso era che l'intera Via Lattea si stesse muovendo rispetto alla radiazione di fondo a una velocità di oltre 600 chilometri al secondo! Non solo. La Via Lattea fa parte, insieme a una trentina di altre galassie simili che si trovano in un raggio di circa 10 milioni di anni luce, di un sistema tenuto fortemente legato dalla forza di gravità: il cosiddetto *Gruppo Locale*. Il risultato di Smoot, quindi, non soltanto implicava che la Via Lattea era in movimento rispetto alla radiazione di fondo, ma che tutto il Gruppo Locale si stava precipitando a rotta di collo nella stessa direzione. Che cosa poteva mai causare il moto di questa immensa quantità di materia?

Per capire quanto fu importante il risultato trovato dal gruppo di Smoot, bisogna tenere presente che, per lungo tempo, si era ritenuto che il moto delle galassie fosse dovuto unicamente all'espansione dell'Universo, e potesse quindi essere descritto perfettamente dalla legge di Hubble. Secondo questo quadro, le galassie sarebbero state le più grandi concentrazioni di materia esistenti nell'Universo, e la loro distribuzione nel Cosmo sarebbe stata più o meno uniforme, secondo il principio cosmologico. Ma c'era stato chi aveva sfidato questa convinzione.

Negli anni cinquanta, una giovane astronoma, Vera Rubin,

notò che, sebbene la maggior parte delle galassie si muovessero come previsto dalla legge di Hubble, in alcuni casi esse si discostavano in modo significativo dal comportamento atteso. La Rubin presentò queste osservazioni, che facevano parte del suo lavoro di tesi, al congresso della American Astronomical Society, dove furono accolte da un generale scetticismo, se non addirittura da ostile indifferenza. Il motivo di questa reazione fu dovuto, in parte, all'inesperienza della giovane studiosa che, come in seguito riconobbe con un gioco di parole, aveva presentato i risultati in maniera "nebulosa". Tuttavia, si era anche messa in luce una buona dose di conservatorismo da parte della comunità accademica, visto che i risultati sembravano profanare il lavoro di Hubble, circondato da un alone di inviolabilità che durava ormai da decenni.

Tra i pochi che presero seriamente i risultati di Rubin ci fu l'astronomo francese Gérard de Vaucouleurs. De Vaucouleurs stava in quel periodo conducendo studi sulla possibile esistenza di enormi aggregazioni di materia, di dimensioni molto maggiori di una galassia, che erano state ipotizzate per la prima volta intorno agli anni trenta da un astronomo svizzero di origine bulgara noto per le sue idee eretiche, Fritz Zwicky. Se queste immense concentrazioni di materia fossero davvero esistite, avrebbero distorto a tal punto lo spazio nelle loro vicinanze da produrre sensibili variazioni nelle velocità predette dalla legge di espansione, che pure sarebbe rimasta perfettamente valida per l'Universo nel suo complesso. Proprio come il moto dei pianeti nel Sistema Solare non risente dell'espansione dell'Universo, perché essi sono troppo legati gravitazionalmente al Sole, così le galassie interessate dalla presenza di questi giganti cosmici avrebbero avuto una *velocità peculiare*, cioè un moto proprio slegato dall'andamento medio dell'Universo.

La misura della velocità della Galassia ottenuta dall'osservazione dell'anisotropia di dipolo dava definitivamente ragione a Vera Rubin dopo oltre un ventennio, confermando l'esistenza di deviazioni dalla legge di Hubble nel moto delle galassie. Inoltre, mostrava anche che il Gruppo Locale aveva una velocità peculiare talmente grande da costringere a ipotizzare la presenza di un'enorme concentrazione di massa, fino a quel momento rimasta nascosta alle osservazioni. L'Universo sembrava quin-

di essere molto più disomogeneo di quanto i cosmologi avessero creduto: non tanto da dover abbandonare il principio cosmologico o da dover rivedere il modello del Big Bang, ma abbastanza da complicare lo scenario della formazione delle strutture cosmiche. Come si legge nell'articolo pubblicato nel 1977 da Smoot e dai suoi collaboratori sulla rivista *Physical Review Letters*, "la grande velocità peculiare della Via Lattea è inattesa, e presenta una sfida alla teoria cosmologica".

Negli anni seguenti, una lunga serie di osservazioni volte a determinare la distribuzione della materia su grande scala rafforzò questa sensazione, e diede origine a una nuova immagine dell'Universo: un Cosmo in cui le galassie non sono distribuite in maniera più o meno uniforme e casuale nello spazio, ma si aggregano a gruppi di decine, centinaia o anche migliaia, formando strutture più grandi, dette *ammassi*, delle dimensioni di parecchi milioni di anni luce. A loro volta, gli stessi ammassi si raggruppano con altri ammassi, formando *superammassi* estesi per centinaia di milioni di anni luce. Il nostro piccolo Gruppo Locale, ad esempio, insieme ad altri ammassi, fa parte del *superammasso della Vergine*. In alcune regioni dell'Universo esistono enormi vuoti, in cui non è possibile trovare alcuna traccia di stelle o galassie: in altre regioni, la materia si concentra in strutture di dimensioni inimmaginabili, tali da esercitare la loro attrazione gravitazionale anche su galassie immensamente lontane, come accade alla nostra. Uno di questi immensi coaguli di materia, detto *Grande Attrattore*, si trova più o meno al centro del superammasso della Vergine, a una distanza di circa 200 milioni di anni luce dalla Via Lattea.

Secondo la nuova visione del Cosmo che stava emergendo negli anni ottanta, dunque, la materia si distribuisce nell'Universo in una maniera che ricorda molto una schiuma: una gerarchia di strutture di dimensioni crescenti, bolle vuote circondate da "muri" di materia, filamenti che congiungono nodi di densità più elevata, una rete di interconnessioni di complessità straordinaria. Trovare una spiegazione per la formazione di questa meravigliosa varietà a partire dall'estrema semplicità primordiale diventava un compito sempre più urgente.

## Via, più veloce della luce!

Nello stesso periodo in cui i cosmologi osservativi riordinavano la mappa del Cosmo, arrivando alla conclusione che la materia fosse distribuita in modo più complicato del previsto, stava giungendo a maturazione un'altra crisi interna al modello del Big Bang che si era andata trascinando per un certo periodo, questa volta tra i cosmologi teorici. Già verso la fine degli anni sessanta, qualcuno, in particolare Robert Dicke, si era reso conto che il fantastico successo del modello del Big Bang rischiava di essere rovinato da alcuni piccoli dettagli a cui nessuno aveva dato molto peso. In particolare, sembrava che il buon funzionamento del modello dipendesse in modo cruciale dal realizzarsi di alcune condizioni di cui non si era in grado di dare una spiegazione logica, e che anzi avevano tutta l'aria di essere coincidenze fortuite, per quanto assurdamente improbabili. Cerchiamo di capire un po' meglio qual era il problema.

Abbiamo visto che il modo in cui l'Universo evolve dipende dalla sua densità media. Se, ad esempio, essa supera un certo valore critico, cioè se $\Omega$ è maggiore di 1, l'attrazione gravitazionale esercitata da tutta la massa contenuta nell'Universo finisce a un certo punto per arrestarne l'espansione e farlo ricollassare su se stesso. Il tempo trascorso prima del collasso si può calcolare facilmente, e dipende proprio da quanto la densità dell'Universo supera la densità critica: se queste due grandezze sono confrontabili, ovvero se $\Omega$ è solo leggermente più grande di 1, l'Universo si espande per diverse decine di miliardi di anni prima di ricollassare. Tuttavia, un Universo con $\Omega$ anche solo poche volte più grande di 1 non dura abbastanza a lungo da poter formare galassie, stelle e pianeti; in Universo del genere la nostra stessa esistenza sarebbe stata impossibile. Un ragionamento analogo si può fare nel caso in cui $\Omega$ sia minore di 1. Se la densità dell'Universo è considerevolmente più piccola di quella critica, l'Universo si espande in modo così rapido che in un tempo brevissimo diventa incredibilmente rarefatto: così rarefatto che non è possibile la formazione di alcun tipo di struttura complessa. Se le cose fossero andate in questo modo, oggi l'Universo sarebbe solo un enorme spazio vuoto, e nient'altro. Pertanto, ancora prima di misurare la densità media dell'Universo, sappiamo già che essa

deve avere un valore non troppo lontano da quello critico: è una conclusione a cui possiamo giungere semplicemente constatando che l'Universo è abbastanza vecchio da avere consentito la formazione di galassie, stelle, pianeti e, infine, noi stessi. Bene, direte voi: allora tutto questo significa soltanto che $\Omega$ è prossimo a 1. Quale sarebbe il grande problema?

Il grande problema è questo: quando si fanno i calcoli usando le equazioni del modello del Big Bang, si scopre che il valore di $\Omega$ non resta costante durante l'espansione dell'Universo, ma tende ad allontanarsi sempre di più dal valore $\Omega$=1. Per la precisione, se a un certo punto $\Omega$ è minore di 1, lo diventa sempre di più man mano che passa il tempo; se invece è maggiore di 1, col passare del tempo diventa ancora più grande. L'unico caso in cui il valore di $\Omega$ non cambia con il tempo è se esso è esattamente uguale a 1. Tutti i valori diversi da $\Omega$=1 si trovano invece in una situazione drammaticamente instabile.

In altre parole, se pochi secondi dopo il Big Bang l'Universo avesse avuto un valore di $\Omega$ leggermente diverso da 1, solo di poco più grande o più piccolo, questa piccola differenza avrebbe continuato a ingrandirsi, ingigantendosi a dismisura, cosicché oggi il valore di $\Omega$ sarebbe o enorme, oppure minuscolo. Il fatto che osserviamo che $\Omega$ è "ragionevolmente" prossimo a 1 nell'Universo attuale, significa che "qualcosa" ne ha "regolato" il valore con incredibile precisione nei primi istanti dopo il Big Bang. Non stiamo parlando di un aggiustamento grossolano, ma di una vera e propria regolazione fine (che i cosmologi chiamano, con termine inglese, *fine tuning*). Per capirci: 1 secondo dopo il Big Bang, $\Omega$ doveva essere pari a 1 a meno di un errore piccolissimo, qualcosa come 0,0000000000000001. E a tempi ancora precedenti la precisione richiesta era ancora maggiore.

I fisici trovano estremamente fastidioso che qualcosa debba essere "regolato a mano" in una teoria senza una buona ragione, soprattutto se il livello di precisione richiesto è enorme, come in questo caso. Ovviamente, potrebbe darsi che $\Omega$ sia esattamente uguale a 1, nel qual caso lo sarebbe sempre stato e lo sarà per sempre. Ma questo non risolve il dilemma: per quale ragione tra tutti i possibili valori che $\Omega$ poteva assumere la natura avrebbe scelto esattamente questo? Siamo in una situazione paradossale: più o meno come se, entrando per la prima volta in una

stanza, trovassimo su un tavolo una matita in equilibrio perfetto sulla punta. Sebbene quella posizione sia consentita dalle leggi della fisica, è molto improbabile che si sia prodotta per caso. Ci piacerebbe saperne di più, ma come ci sentiremmo se a una nostra richiesta di spiegazioni tutti rispondessero semplicemente: "Che io sappia, la matita è sempre stata in quella posizione"?

L'Universo sembrerebbe quindi avere avuto inizio in una condizione molto speciale, estremamente ben calibrata in modo da consentirgli di evolversi per tempi straordinariamente lunghi. Se ricordate il legame tra il valore di $\Omega$ e le proprietà geometriche dell'Universo, il fatto che $\Omega$ debba essere molto vicino a 1 si può anche rifrasare in termini geometrici, dicendo che l'Universo sembra essere inspiegabilmente "troppo" piatto.

Il problema dell'estrema vicinanza della densità al valore critico, detto anche *problema della piattezza*, non può avere una spiegazione soddisfacente all'interno del modello del Big Bang. Nell'ambito di questo modello, $\Omega$ è semplicemente un parametro numerico che possiamo tentare di misurare, ma non siamo in grado di dire per quale motivo dovrebbe avere un valore incredibilmente prossimo a 1. Non c'è alcun motivo *a priori* per cui l'Universo debba essere piatto: qualsiasi sia il meccanismo fisico che ha causato la regolazione fine necessaria a garantire che esso abbia una densità vicina a quella critica, deve essere cercato altrove.

Ma, come si sa, i problemi non arrivano quasi mai da soli. Ecco che allora, come se non bastasse il problema della piattezza, il modello del Big Bang rivela un'altra vulnerabilità, e proprio in uno degli aspetti che sembrerebbero essere più ragionevoli. Sappiamo che il modello del Big Bang poggia sulle fondamenta del principio cosmologico, ovvero sul fatto che l'Universo deve essere, in media, abbastanza uniforme. Be', a un certo punto i cosmologi si sono accorti che l'Universo è un po' troppo uniforme. Cerco di spiegarmi meglio. Prima dobbiamo però introdurre un nuovo concetto.

Abbiamo messo in risalto il fatto che, mandando a ritroso il moto di fuga delle galassie descritto dalla legge di Hubble, si giunge alla conclusione che l'Universo ha iniziato a espandersi in un momento ben preciso: il Big Bang, appunto. Questo modo di dire è un po' scorretto, in quanto non c'era nessun momen-

to prima del Big Bang, quindi proviamo a riformularlo un po' meglio: diciamo che l'Universo si sta espandendo da un tempo finito. Ora, pensiamo alla cosa più veloce che esiste in natura: la luce (o, più in generale, la radiazione elettromagnetica). Un segnale luminoso, ricordiamolo, si propaga nel vuoto alla velocità di 300 mila chilometri al secondo. Nessuna informazione può viaggiare a velocità maggiori da un punto all'altro dello spazio. Quindi, se vogliamo comunicare con qualcuno, e vogliamo farlo alla massima velocità possibile, non possiamo fare altro che inviargli segnali luminosi (o un altro segnale elettromagnetico). Ora chiediamoci: se qualcuno avesse inviato un segnale luminoso al momento del Big Bang, quanta distanza avrebbe percorso quel segnale da allora fino ad oggi? Ciò equivale a chiederci: quanto è lontana la cosa più lontana che possiamo osservare nell'Universo? La luce ha avuto a disposizione soltanto un tempo finito per viaggiare dal Big Bang a oggi, e può aver quindi percorso soltanto una distanza finita. Qualsiasi segnale luminoso partito da una distanza maggiore di quella non ha ancora fatto in tempo a raggiungerci.

Ci sono quindi zone dell'Universo di cui non possiamo (ancora) sapere niente. In altre parole, l'Universo ha un *orizzonte*: esattamente come avviene sulla Terra, non possiamo guardare punti del Cosmo che si trovino oltre una certa distanza. La differenza sta solo nel fatto che sulla Terra l'orizzonte è fermo, mentre nell'Universo l'orizzonte piano piano si allarga, inglobando nuove regioni di spazio, perché la luce ci giunge da regioni via via più lontane con il passare del tempo. Oggi, la dimensione dell'Universo osservabile coincide pressappoco con la distanza da cui provengono i fotoni del fondo cosmico. L'orizzonte cosmico si trova quindi a una distanza immensa da noi, ma pur sempre finita. In passato, l'orizzonte era più vicino.

Chiarito questo punto, possiamo tornare al problema da cui siamo partiti, ovvero quello dell'eccessiva uniformità dell'Universo. Questo problema è originato proprio dalla presenza nell'Universo di un orizzonte di ampiezza crescente. Infatti, la porzione di Universo che attualmente siamo in grado di osservare, cioè tutto quello che si trova adesso all'interno dell'orizzonte, è stato in passato per lungo tempo all'esterno dell'orizzonte. Ma allora, come mai l'Universo ci appare oggi così simile in tutte le

direzioni? Come ha fatto l'informazione su quale doveva essere la condizione "media" dell'Universo a viaggiare più velocemente della luce e a spargersi in ogni angolo del Cosmo? Nessun tipo di interazione può essere stata abbastanza rapida da aver reso identiche le condizioni in punti dell'Universo così lontani da essere stati per miliardi di anni fuori dei rispettivi orizzonti.

Questo rompicapo assume contorni assolutamente drammatici se prendiamo in esame il grado di uniformità osservato nella radiazione cosmica di fondo. Abbiamo visto che essa ci appare provenire da ogni punto del cielo con una temperatura pressoché identica. Questa sembra a prima vista una constatazione abbastanza innocua, che anzi ci rende fiduciosi del fatto che l'Universo primordiale abbia attraversato una fase abbastanza semplice da poter essere descritta in modo agevole. Ma adesso pensiamo alla cosa in un modo un po' diverso.

Mettiamoci nei panni di Penzias e Wilson, puntiamo la nostra antenna diritto davanti a noi e misuriamo la temperatura della radiazione di fondo. Poi giriamoci di 180° e ripetiamo la misura: troviamo più o meno la stessa temperatura. Ma i fotoni raccolti dalla nostra antenna nella prima misura sono partiti oltre 13 miliardi di anni fa da una regione dell'Universo completamente diversa da quella dei fotoni della seconda misura. In realtà, per tutto questo tempo, i due gruppi di fotoni hanno viaggiato in direzione opposta, alla velocità della luce, e si sono incontrati per la prima volta oggi, nella nostra antenna! Come poteva un gruppo di fotoni conoscere con tale precisione la temperatura dell'altro? Come hanno fatto due regioni dell'Universo che 300 mila anni dopo il Big Bang erano completamente fuori dai rispettivi orizzonti a comunicarsi informazioni sul loro stato fisico? È una situazione apparentemente priva di senso, un po' come se Neil Armstrong, mettendo piede per la prima volta sulla Luna, vi avesse trovato ad attenderlo una copia del quotidiano del giorno...

Come si esce da questa situazione ingarbugliata? Guardiamo la cosa con un po' più di attenzione. A volte, per trovare la soluzione a un problema bisogna solo formularlo con maggiore chiarezza. Quello che ci turba è che zone dell'Universo che oggi sono troppo lontane tra loro per aver comunicato, sembrerebbero magicamente essere state in contatto in qualche epoca

remota. Ebbene, le cose potrebbero davvero essere andate così: zone dell'Universo primordiale che si trovavano inizialmente gomito a gomito potrebbero essere state improvvisamente trascinate a distanze enormi, in modo da perdere la possibilità di comunicare tra loro. Dopotutto, non sappiamo che l'Universo si espande? Non è forse cominciato tutto così, da un punto infinitamente piccolo? Non potrebbe essere stata l'espansione stessa dell'Universo a creare una separazione tra punti dello spazio inizialmente vicini, trascinandoli via come barche alla deriva che spariscono dai rispettivi orizzonti? Il ritmo di espansione attuale è troppo basso per separare punti che si trovano già all'interno dell'orizzonte, ma chi ci impedisce di supporre che, in passato, l'espansione sia stata talmente violenta da tagliare fuori punti del Cosmo inizialmente in contatto? Sembra un'idea allettante, e in effetti ci stiamo avvicinando alla soluzione del problema, ma c'è ancora un ostacolo da superare.

L'ostacolo è rappresentato dal fatto che, per portare fuori dell'orizzonte due punti inizialmente in contatto, bisogna farli allontanare a velocità maggiori di quella della luce! In ogni istante, infatti, la dimensione dell'orizzonte è definita proprio dalla distanza percorsa dalla luce fino a quel momento. Ma l'impossibilità di superare la velocità della luce è uno dei pilastri fondamentali (e dei fatti meglio verificati) della fisica moderna. Niente da fare, allora? Non esattamente. È vero che nessun segnale può viaggiare nello spazio più velocemente della luce, ma l'espansione dell'Universo riguarda lo spazio stesso, e può avvenire a velocità arbitraria. Possiamo quindi portare due punti qualsiasi dell'Universo fuori dell'orizzonte, facendoli muovere non nello spazio, ma con lo spazio.

I problemi del modello del Big Bang possono perciò essere risolti ipotizzando un periodo di espansione accelerata, un meccanismo battezzato dai cosmologi con il termine *inflazione* (cosa che non ha niente a che vedere con l'economia). Secondo lo scenario inflazionario, in una fase primordiale dell'evoluzione cosmica, una regione di spazio minuscola ed estremamente uniforme si espanse improvvisamente diventando in breve tempo molte volte più grande dell'orizzonte. Questo periodo di espansione forsennata fu talmente efficiente che, in un lasso di tempo piccolissimo (dell'ordine di $10^{-35}$ secondi), la regione inte-

ressata crebbe di $10^{60}$ volte. Dopo questa breve fase concitata, l'espansione riprese il suo corso normale.

Per capire la differenza tra i due ritmi di espansione, quello inflazionario e quello attuale, basti pensare che, nei miliardi di anni passati dalla fine della fase inflazionaria a oggi, l'Universo non è ancora riuscito a espandersi tanto quanto si espanse in quella infinitesima frazione di tempo! Esistono regioni di quel minuscolo bruscolino ingigantito dall'inflazione che si trovano ancora oggi molto al di fuori del nostro orizzonte, e vi rimarranno per miliardi di anni. L'Universo ci appare quindi uniforme semplicemente perché tutto ciò che oggi possiamo osservare era, un tempo, una regione microscopica e indifferenziata.

Ma le meraviglie dell'inflazione non sono finite. Essa risolve due problemi al prezzo di uno: non solo rende l'Universo incredibilmente uniforme, ma lo fa diventare anche quasi perfettamente piatto. Qualunque curvatura esistente prima dell'inflazione venne infatti spianata dalla crescita smisurata subita dall'Universo durante i suoi primi istanti di vita. Se fossimo seduti su un pallone da calcio e questo venisse improvvisamente gonfiato a dismisura, fino a diventare grande quanto la Terra, non saremmo più in grado di affermare che il pallone è rotondo, almeno a giudicare da quello che vediamo all'interno dell'orizzonte. L'inflazione gonfiò il pallone cosmico in modo straordinario, rendendolo talmente grande da farlo sembrare perfettamente piatto all'interno dell'orizzonte (figura 3.2). In altre parole, durante l'inflazione il valore di $\Omega$ si avvicinò sempre di più a 1, indipendentemente da quale fosse il suo valore iniziale.

Il concetto di inflazione toglie quindi magicamente le castagne dal fuoco al modello del Big Bang, risolvendone in un colpo solo i problemi senza rendere necessaria una sua revisione radicale. Un brevissimo periodo di crescita accelerata nei primissimi istanti di vita dell'Universo cancella, per così dire, le tracce della sua storia precedente. Tutto diventa esattamente "come se" l'Universo fosse quasi perfettamente piatto e quasi perfettamente uniforme. L'inflazione è il "*deus ex machina*" che dà conto dell'estrema improbabilità delle condizioni iniziali dell'Universo.

Il primo modello di inflazione fu proposto nel 1981 da un giovane fisico teorico, Alan Guth. Nonostante il modello di Guth si sia rivelato in breve tempo inutilizzabile a causa di alcuni suoi

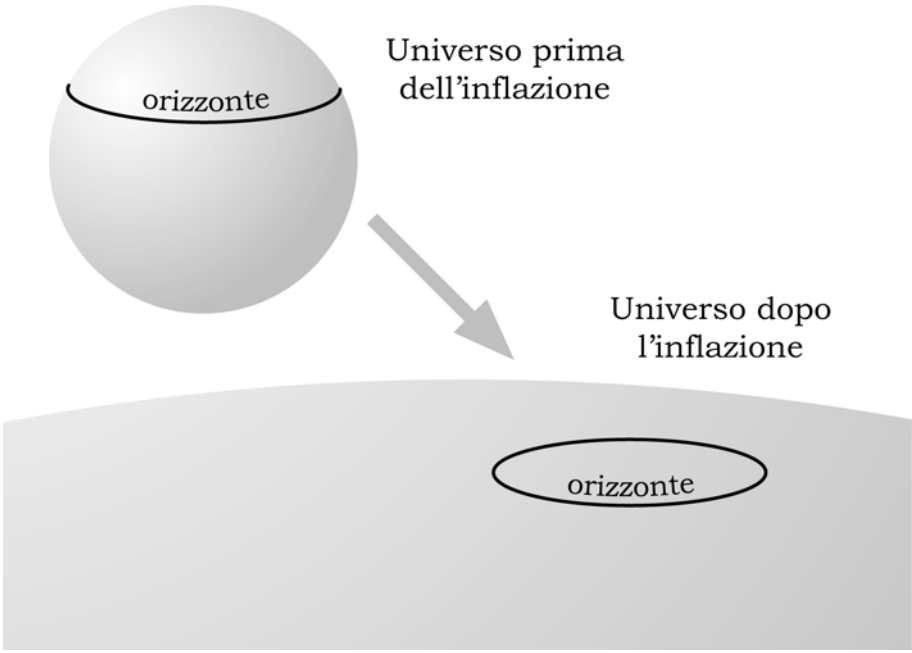



Figura 3.2: L'inflazione agisce in modo da rendere la geometria dell'Universo praticamente piatta all'interno dell'orizzonte. In questo esempio, l'Universo è chiuso prima dell'inflazione e la curvatura è ben visibile all'interno dell'orizzonte. L'inflazione fa espandere enormemente l'Universo in un periodo molto breve, durante il quale la dimensione dell'orizzonte resta praticamente costante. Dopo l'inflazione, la regione all'interno dell'orizzonte appare praticamente piatta.

problemi interni, la scintilla era stata accesa, e da allora l'idea che l'Universo primordiale abbia subito un periodo di espansione accelerata è diventata enormemente popolare tra i cosmologi. Una rapida ricerca nella letteratura scientifica dei modelli di inflazione proposti negli ultimi 25 anni dà un numero che supera facilmente il centinaio. Nessuno ancora sa quale tipo di stranezza possa aver causato l'incredibile espansione di una regione microscopica dello spaziotempo, anche se ci sono diverse idee in proposito (ne riparleremo ancora nel capitolo 6). Di fatto, l'inflazione non è una teoria consolidata, con un modello univoco che scaturisca da fatti fisici ben conosciuti e motivati. È più un'idea di lavoro, uno scenario che serve a unificare una serie di caratte-

ristiche che i cosmologi ormai ritengono debbano far parte di un modello cosmologico sensato. Ma uno scenario straordinariamente efficace e, come vedremo tra breve, abbastanza fecondo da produrre conseguenze impreviste e importantissime.

## Caos primordiale

Ritorniamo ora al problema della formazione della complessa rete di strutture che osserviamo nell'Universo. Diamo per buona l'idea che l'instabilità gravitazionale abbia giocato un ruolo decisivo, aggregando lentamente, mattone dopo mattone, le immense costruzioni cosmiche intorno all'impalcatura delle perturbazioni primordiali. Allora, la domanda che abbiamo finora eluso, ma a cui dobbiamo rispondere per svelare il mistero di come è stato costruito il complesso edificio che osserviamo oggi è: come è sorta l'ossatura iniziale? Come sono emersi i semi cosmici da cui tutto è iniziato?

I cosmologi hanno dovuto penare per molto tempo su questo problema, che è estremamente complicato da affrontare nel contesto del modello del Big Bang. Si tratta, a ben vedere, di una tipica situazione del tipo "è nato prima l'uovo o la gallina?": vorremmo avere dei semi da cui iniziare la formazione di strutture cosmiche, ma non possiamo formare i semi stessi attraverso lo stesso meccanismo di instabilità gravitazionale che genera le strutture! Il problema è aggravato dal fatto che, nell'ambito del modello del Big Bang, in ogni istante l'Universo potrebbe contenere soltanto perturbazioni di raggio minore dell'orizzonte, dal momento che nessuna interazione fisica avrebbe avuto abbastanza tempo per modificare la densità in zone separate da una distanza maggiore. Ma questo renderebbe troppo lento il processo di formazione delle strutture: le perturbazioni di densità più estese, infatti, potrebbero crearsi solo in epoche relativamente recenti, troppo tardi per poter dar vita alle gigantesche aggregazioni osservate nel Cosmo.

Per fortuna, a un certo punto divenne chiaro che lo scenario dell'inflazione, ideato inizialmente, come abbiamo visto, per tutt'altri motivi, tornava utile anche per risolvere i problemi relativi all'origine delle perturbazioni primordiali. Per capire perché,

dobbiamo osservare più da vicino la microscopica porzione di spaziotempo da cui, a seguito della strepitosa crescita inflazionaria, è scaturita la regione che oggi costituisce il nostro Universo. Questa regione era inizialmente talmente minuscola da essere molto più piccola di un atomo. Su dimensioni così ridotte, la materia non si comporta nel modo a cui siamo abituati quando abbiamo a che fare con gli oggetti ordinari, ma secondo le leggi della *meccanica quantistica*.

La meccanica quantistica fu l'altra grande rivoluzione compiuta dai fisici della prima metà del XX secolo, più o meno nello stesso periodo in cui Einstein ideò la teoria della relatività generale. Laddove però la teoria di Einstein serve a descrivere la realtà su scale immensamente grandi, la meccanica quantistica descrive i fenomeni che hanno luogo a dimensioni piccolissime, del tipo di quelle di un atomo appunto, o anche molto minori. Abbiamo già visto alcune idee della meccanica quantistica nel capitolo 2, quando ci siamo occupati della natura della luce. Essa prese il via proprio dagli studi sul corpo nero, e dalla scoperta della natura dualistica dei fenomeni elettromagnetici, che possono essere descritti allo stesso tempo sia in termini di onde che si propagano nel vuoto, che di pacchetti discreti di energia, i fotoni.

Una delle basi della meccanica quantistica è il cosiddetto *principio di indeterminazione*, formulato da Werner Heisenberg nel 1927: detto in parole molto semplici, esso implica che non possiamo conoscere nello stesso momento la posizione e la velocità di una particella. L'esistenza del principio di indeterminazione, così come di altre bizzarrie previste dalla meccanica quantistica, non ha nessuna conseguenza percettibile per oggetti di dimensioni ordinarie: voi sapete perfettamente dove si trova la poltrona su cui siete seduti e che velocità ha, vero? Ma con le particelle elementari, la situazione è completamente diversa. Se misurate la loro posizione non riuscite a determinarne precisamente la velocità, e viceversa.

Questo significa che il mondo, a livello microscopico, è in preda a un'agitazione frenetica, una specie di "ballo di San Vito" che coinvolge ogni particella, che non riesce a stare ferma nello stesso posto molto a lungo. Non solo, ma un analogo principio lega anche l'energia di una particella al tempo che impieghiamo

a misurarla. Se osserviamo la particella per un periodo molto lungo, la sua energia risulterà essere pressoché costante, ma se ci distraiamo per un attimo, l'energia potrà in quel breve istante fluttuare anche di quantità enormi. Possiamo addirittura creare particelle prendendo in prestito l'energia necessaria letteralmente dal nulla, a patto che esse vivano per un istante talmente breve da non essere osservabili.

Il principio di indeterminazione, applicato al minuscolo Cosmo prima dell'inflazione, implica che esso si trovava sotto il dominio di una sorta di "caos quantistico". Il contenuto dell'Universo in quegli istanti remotissimi, di qualunque cosa si trattasse, fluttuava in modo casuale da punto a punto dello spazio, e non aveva un comportamento prevedibile. Allora, cosa deve essere avvenuto durante l'inflazione del nostro Universo in miniatura? Quelle microscopiche *fluttuazioni quantistiche* dovute al principio di indeterminazione, che avevano inizialmente dimensioni molto più piccole dell'orizzonte, vennero dilatate a dismisura, fino a che non raggiunsero un'estensione immensamente più grande di quella dell'orizzonte. Quando ciò accadde, esse vennero per così dire "congelate": infatti, una perturbazione più grande dell'orizzonte semplicemente non può sapere di essere una perturbazione! Pensate a quello che accadrebbe sulla Terra se qualcuno vi portasse, a vostra insaputa, su un altopiano talmente esteso che i suoi bordi venissero a cadere oltre l'orizzonte: guardandovi intorno non avreste alcun modo di capire che vi trovate molto più in alto del livello del mare.

Al termine dell'inflazione, dunque, perturbazioni di densità di tutte le dimensioni si ritrovarono "congelate" fuori dell'orizzonte, pronte per essere utilizzate. Man mano che l'orizzonte, crescendo, inglobava nuove regioni di Universo, perturbazioni di raggio sempre più grande si accorsero di essere perturbazioni, e poterono servire da semi per iniziare la formazione di strutture secondo il meccanismo dell'instabilità gravitazionale. L'inflazione, quindi, ci sbarazza ancora una volta di un grosso grattacapo in maniera estremamente elegante, fornendoci un meccanismo microscopico plausibile per generare le perturbazioni primordiali subito dopo il Big Bang. Inoltre, le perturbazioni prodotte durante l'inflazione sono di un tipo che è estremamente attraente per i cosmologi. Vediamo in che senso.

Agli inizi degli anni settanta, molto prima che la teoria inflazionaria venisse proposta da Alan Guth, i cosmologi Edward Harrison negli Stati Uniti e Yakov Zel'dovich in Unione Sovietica avevano proposto che le fluttuazioni di densità nell'Universo primordiale, qualunque fosse il meccanismo che le aveva prodotte, dovessero essere tutte della stessa entità, indipendentemente dalla loro dimensione caratteristica. Il motivo di questa assunzione stava nel fatto che se le perturbazioni che interessavano regioni di piccola scala fossero state molto più importanti di quelle esistenti su regioni più estese, le strutture più piccole si sarebbero create molto velocemente, e l'Universo si sarebbe popolato in breve tempo di oggetti piccoli e compatti, senza mai arrivare a creare la struttura complessa che invece osserviamo oggi a scale più grandi; viceversa, se avessero pesato di più le perturbazioni di scala più grande, si sarebbero creati per primi degli oggetti enormi, delle dimensioni di un ammasso di galassie o più grandi, che avrebbero attirato nel loro campo gravitazionale gli oggetti più piccoli (come la nostra Galassia) a una velocità enorme, incompatibile con le osservazioni. Appena i cosmologi iniziarono a studiare quale tipo di perturbazioni venissero generate durante la fase inflazionaria, essi si resero conto che erano proprio del tipo previsto da Harrison e Zel'dovich. Le fluttuazioni casuali disseminate nel Cosmo dall'inflazione seguono una specie di principio democratico, senza preferenze per quelle di una certa scala rispetto alle altre.

È il caso di sottolineare la grande fecondità dell'idea inflazionaria. Inizialmente essa fu introdotta per alleviare i problemi relativi alle condizioni iniziali dell'Universo, ossia la sua estrema piattezza e uniformità; in seguito, sorprendentemente, saltò fuori dal cilindro un meccanismo semplice e coerente per dare conto delle piccole fluttuazioni di densità necessarie a spiegare la complessa struttura che osserviamo nel Cosmo. L'inflazione, quindi, non soltanto si è dimostrata capace di "spianare" la curvatura dell'Universo rendendolo, nel suo complesso, quasi perfettamente piatto: ha anche introdotto, ai primordi dell'evoluzione cosmica, piccolissime rugosità nello spaziotempo, deviazioni quasi impercettibili da una condizione di estrema uniformità, da cui ha potuto lentamente formarsi tutto quello che osserviamo. Questo è probabilmente il più grande successo dell'inflazione:

nessun'altra teoria è in grado di spiegare l'origine delle perturbazioni primordiali con la stessa semplicità. Inoltre, questa è una previsione cruciale, che più di ogni altra fa fare all'inflazione il salto da fantasiosa speculazione a teoria fisica verificabile. Come abbiamo visto, infatti, la presenza dei semi cosmici primordiali dovrebbe essere visibile sotto forma di variazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo. Il passaggio attraverso una fase inflazionaria deve aver lasciato tracce profonde nella storia cosmica, che possono essere sottoposte al vaglio delle osservazioni.

Alla fine degli anni ottanta, era però drammaticamente chiaro che non c'era alcuna fluttuazione nella temperatura della radiazione cosmica di fondo al livello previsto dai calcoli teorici. Questo fatto rischiò di mandare in crisi l'idea stessa che le strutture cosmiche si fossero formate per instabilità gravitazionale. Il fatto che non ci fossero tracce osservabili nella radiazione di fondo poneva infatti vincoli molto stringenti alla possibile grandezza di eventuali semi primordiali. In altre parole, se i semi c'erano davvero, dovevano essere molto piccoli. All'epoca, i cosmologi erano convinti che perturbazioni così piccole non avrebbero avuto abbastanza tempo per crescere fino a formare le strutture cosmiche osservate nell'Universo. Ma, poiché le strutture esistono – è un dato di fatto –, da qualche parte il modello teorico di formazione delle strutture era sbagliato. La via d'uscita da questa *impasse* arrivò quando i cosmologi iniziarono a rendersi conto, come l'Amleto di Shakespeare, che forse c'erano più cose nell'Universo di quello che avevano fino allora immaginato.

## Il regno delle tenebre

Per centinaia di anni, gli astronomi si sono costruiti un'idea dell'Universo basata principalmente su quello che riuscivano a osservare in maniera diretta. Il segno più immediato dell'esistenza di un oggetto celeste è dato dalla luce che esso emette. Ad esempio, possiamo vedere le galassie perché sono composte di stelle. L'astronomia è andata a caccia dei più flebili barlumi di luce provenienti dai quattro angoli del Cosmo, sviluppando tecniche complesse e ingegnose, armeggiando con specchi, lenti, lastre

fotografiche, per non perdere nemmeno uno dei preziosi fotoni in viaggio nell'Universo.

Ma la luce visibile non è tutto. Nuove prospettive osservative si sono aperte quando si è compreso che nel Cosmo avvengono fenomeni che causano copiose emissioni di energia in altre bande dello spettro elettromagnetico: oggi, la nostra visione dell'Universo è stata ampliata dall'uso di strumenti che permettono di scandagliare il cielo alla ricerca di radiazione ultravioletta e infrarossa, di raggi X, di microonde, di raggi gamma. La scoperta della radiazione cosmica di fondo è stata merito proprio di questo potenziamento dei nostri occhi consentito dall'avanzamento delle tecnologie.

Sappiamo anche che non tutti i corpi celesti producono "in proprio" la luce che li rende visibili. I pianeti del Sistema Solare, ad esempio, sono osservabili solo grazie al fatto che essi riflettono la luce emessa dal Sole. È chiaro che una parte della materia contenuta nell'Universo emette pochissima radiazione elettromagnetica, ed è difficilmente osservabile a grandi distanze. Gli astronomi hanno per molto tempo ritenuto che il contributo complessivo di questa materia poco luminosa fosse trascurabile. Basti pensare a qual è la situazione nel Sistema Solare. Se sommiamo tutta la massa dei pianeti, dei satelliti e degli altri oggetti non brillanti, essa è circa 1000 volte più piccola di quella del Sole: ben poca cosa.

A partire dalla fine degli anni settanta, però, quella che era sembrata una solida certezza cominciò a vacillare. Diversi indizi indipendenti stavano convergendo nella stessa direzione, suggerendo che la materia non direttamente visibile potesse non soltanto essere una presenza non trascurabile nell'Universo, ma addirittura la componente più abbondante.

La possibilità che esistesse molta più materia di quella direttamente osservabile fu ipotizzata per la prima volta negli anni trenta da Fritz Zwicky. Come abbiamo già visto, Zwicky pensava, basandosi sull'osservazione di deviazioni dalla legge di Hubble nel moto delle galassie, che alcune di esse facessero parte di grandi strutture tenute insieme dalla forza di gravità. Di fatto, Zwicky aveva previsto l'esistenza degli ammassi di galassie.

Ma le galassie stesse non potevano giustificare con la loro sola massa l'enorme attrazione gravitazionale necessaria a tenere

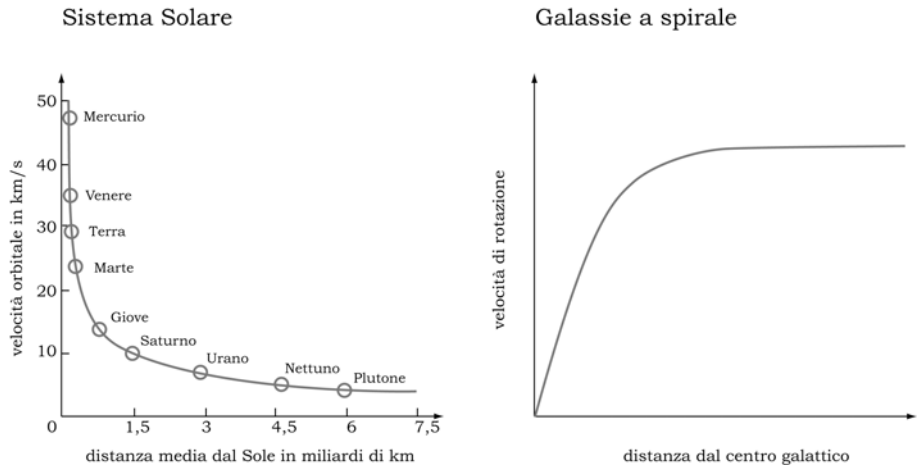



Figura 3.3: La velocità orbitale dei pianeti del Sistema Solare decresce all'aumentare della loro distanza dal Sole, come mostrato nel grafico di sinistra. Lo stesso non accade per la velocità delle stelle nel disco di una galassia a spirale, che si mantiene pressoché costante allontanandosi dal centro galattico.

unito un ammasso: doveva essere presente una grande quantità di materia invisibile, o *materia oscura*, che forniva il legame necessario. Durante la prima metà degli anni settanta, diversi cosmologi, tra cui Jeremiah Ostriker e James Peebles, calcolarono che, in mancanza di una grande quantità di materia oscura a fare da collante gravitazionale, persino le singole galassie sarebbero estremamente instabili e potrebbero frammentarsi in pezzi più piccoli, invece di sopravvivere per miliardi di anni come sembra essere accaduto.

La prova più forte dell'esistenza di materia oscura nelle galassie arrivò nel 1978. Vera Rubin (ancora lei) in collaborazione con Kent Ford, stava conducendo una serie di misure sulla velocità delle stelle nelle galassie a spirale, cioè quelle galassie simili alla nostra, in cui una parte delle stelle si raggruppa in un nucleo centrale di forma sferica, e il resto in una regione a forma di disco. Attraverso lo studio del moto delle stelle, Rubin sperava proprio di poter stimare la massa oscura della galassia, allo stesso modo in cui, se il Sole fosse invisibile, potremmo comunque dedurne la presenza e la massa osservando le orbite dei pianeti.

Nel caso delle galassie a spirale, se le stelle fossero l'unica materia presente, quelle che si trovano nelle zone più esterne del disco dovrebbero ruotare intorno al nucleo centrale più o meno nello stesso modo in cui i pianeti ruotano intorno al Sole. Quindi, la velocità di rotazione delle stelle più lontane dal nucleo dovrebbe essere minore di quella delle stelle più vicine: se la rotazione fosse troppo veloce, infatti, la forza centrifuga le strapperebbe rapidamente via dalla galassia, fiondandole lontano nello spazio. Rubin e Ford non trovarono niente di tutto questo (figura 3.3): le stelle esterne ruotavano a una velocità pressochè identica a quella delle stelle interne!

A meno che la teoria della gravitazione, come la conosciamo, sia inadatta a descrivere quello che avviene su scale confrontabili con le dimensioni di una galassia, questo comportamento può essere spiegato in un solo modo: nelle galassie c'è molta più massa di quella visibile, e l'attrazione gravitazionale di tutta questa massa spiega il fatto che le stelle non sfuggono via nonostante la loro alta velocità di rotazione. La materia oscura suggerita dalle osservazioni di Rubin e Ford deve formare una struttura sferica, detta *alone*, estesa molto al di là del confine visibile delle galassie. Gli aloni delle galassie a spirale possono contenere decine di volte più massa di quella visibile sotto forma di stelle.

A completare il quadro, verso la metà degli anni ottanta si cominciò ad avere un'idea più chiara del modo in cui la materia si distribuisce nell'Universo: come abbiamo già visto, stava emergendo l'immagine di un Cosmo popolato da grandi vuoti e da grandi concentrazioni di materia, da galassie raccolte in ammassi, filamenti, muri. L'esistenza stessa di questa complicata gerarchia di strutture era difficile da spiegare senza ipotizzare la presenza di grandi quantità di materia oscura non solo negli aloni galattici, ma anche in tutte le strutture tenute insieme dalla gravità presenti nell'Universo.

Oggi, le prove indirette a favore della presenza di materia oscura nell'Universo sono ormai schiaccianti. In alcuni casi, la luce proveniente da galassie molto lontane viene misteriosamente sdoppiata, distorta, curvata fino ad assumere l'aspetto di grossi archi nel cielo, talvolta addirittura di anelli. Questo fenomeno è dovuto all'effetto di *lente gravitazionale* previsto da

Einstein: la luce viene deviata nel suo cammino dalla curvatura indotta nello spaziotempo dalla presenza di grandi concentrazioni di massa. Gli straordinari spettacoli offerti da queste gigantesche lenti cosmiche non possono che essere dovuti a enormi aggregazioni di materia non visibile. La materia oscura è ormai una presenza incombente con cui i cosmologi sono costretti a fare i conti.

Tutte le evidenze in favore della materia oscura portano inesorabilmente a concludere che essa debba aggirarsi intorno al 20-30% della densità critica dell'Universo. Ma, a rendere estremamente complicata la situazione, c'è la consapevolezza che tutta questa materia oscura non può essere semplicemente dello stesso tipo che ci è familiare e che compone le stelle, i pianeti, noi stessi, gli atomi e tutto quello che vediamo intorno a noi. Come abbiamo visto, infatti, le stime sulle abbondanze degli elementi leggeri derivate dalla nucleosintesi primordiale e il confronto con le osservazioni portano alla conclusione che questo tipo di materia "ordinaria", che i fisici chiamano *materia barionica*, può essere al massimo il 5% della densità critica dell'Universo: un valore troppo basso, che non può essere in grado di spiegare le proprietà gravitazionali osservate nelle strutture cosmiche. Gli aloni galattici, dunque, non possono essere fatti soltanto di stelle troppo deboli per essere viste, o di pianeti enormi e pesantissimi ma per loro natura invisibili. La maggior parte della materia oscura deve essere *non barionica*: questo è altrettanto illuminante che dire che un animale sconosciuto non è un cane, ma per ora è il meglio che si è riusciti a fare.

Della materia oscura non barionica non sappiamo assolutamente niente, se non che, stando all'evidenza indiretta fornita dalle osservazioni cosmologiche, deve essercene tanta in giro. Sappiamo anche che questa materia non deve interagire in modo molto forte con il resto dei costituenti dell'Universo, e in particolare non deve essere una sorgente di radiazione elettromagnetica, altrimenti sarebbe possibile osservarla in maniera diretta. Deve però avere un effetto gravitazionale piuttosto marcato, dal momento che contribuisce a creare gli enormi addensamenti di materia che costituiscono la struttura su grande scala dell'Universo.

L'ipotesi più probabile, perciò, è che la materia oscura sia

costituita da particelle piuttosto pesanti, e dotate di una velocità intrinseca non molto alta, altrimenti sarebbe arduo tenerle segregate in regioni di spazio piuttosto compatte. Inoltre, deve essere un tipo di materia molto stabile, presente nel Cosmo dall'alba dei tempi fino a oggi. Questi requisiti portano a scartare tutte le particelle conosciute dal novero dei possibili candidati a ricoprire il ruolo di massa mancante. L'identikit della particella misteriosa che sembra formare la maggior parte della materia contenuta nell'Universo non corrisponde ad alcuna particella già nota. Ad esempio, i *neutrini*, particelle presenti in gran numero nell'Universo, ma talmente elusive da poter attraversare indisturbate chilometri e chilometri di materia, sono troppo "leggeri" per ambire a un ruolo non marginale nel computo della massa totale dell'Universo. Inoltre, a causa della loro massa insignificante, essi viaggiano a velocità talmente prossime a quelle della luce che tentare di farli partecipare alla formazione di strutture è una battaglia persa. Non c'è verso di tenere i neutrini confinati negli aloni galattici, con buona pace delle misure della velocità di rotazione e delle speranze dei cosmologi.

Rimangono in piedi pochi validi aspiranti al ruolo di materia oscura, candidati di cui si ipotizza l'esistenza sulla base di considerazioni teoriche, particelle esotiche come l'*assione* o il *neutralino*, strane chimere emerse nello sconfinato bestiario escogitato dai fisici teorici per far quadrare l'architettura del mondo microsopico. Ma dell'esistenza di questi misteriosi inquilini del Cosmo non c'è finora alcuna evidenza certa. La ricerca di materia oscura è ormai un campo di fondamentale importanza non solo in cosmologia, ma anche nella fisica delle particelle elementari. Esistono numerosi esperimenti in tutto il mondo pronti a rivelare la minima traccia del passaggio delle sfuggenti particelle di materia oscura non barionica.

La presenza di materia oscura non barionica nell'Universo ha importanti conseguenze per la formazione di strutture, e per la ricerca delle anisotropie causate dalla presenza dei semi primordiali. Infatti, la materia barionica e quella non barionica seguono due strade molto diverse durante il processo di evoluzione delle perturbazioni. La materia barionica può cominciare ad addensarsi intorno ai piccoli grumi di densità iniziali soltanto dopo essersi disaccoppiata dalla radiazione. Prima della ricombina-

zione, quando il plasma e la radiazione sono ancora strettamente legati, il mare di fotoni si comporta infatti come una specie di melassa che ostacola il moto dei barioni, rendendo estremamente inefficace qualsiasi tentativo della gravità di creare concentrazioni di materia intorno alle regioni perturbate. Perciò, la crescita di addensamenti di materia barionica è drasticamente rallentata fino alla ricombinazione.

La materia oscura non barionica non deve sottostare a questa limitazione. Infatti, proprio per la sua natura elusiva, essa non risente di nessun tipo di interazione elettromagnetica con la radiazione e può quindi cominciare ad aggregarsi intorno ai semi primordiali fin dall'inizio. La materia non barionica ha pertanto molto più tempo a disposizione per formare strutture rispetto a quella barionica. Non solo, ma subito dopo la ricombinazione può fornire un'impalcatura già ben avanzata, intorno alla quale i barioni possono aggregarsi in modo molto più efficace che se dovessero fare tutto il lavoro da soli. La formazione di strutture avviene quindi molto più speditamente in un Universo in cui c'è una sostanziale presenza di materia oscura non barionica. I semi cosmici nell'Universo primordiale possono essere molto più piccoli di quanto previsto nei calcoli fatti dai cosmologi nei primi anni settanta, che erano basati sulla presenza di sola materia barionica. Al momento della ricombinazione, le perturbazioni potevano essere anche 100 mila volte più piccole della densità media.

Verso la fine degli anni ottanta, però, i limiti osservativi sulle anisotropie della radiazione cosmica di fondo erano diventati estremamente stringenti. Era possibile escludere che la temperatura fluttuasse di oltre un millesimo rispetto alla media. Se i limiti sperimentali si fossero ulteriormente ridotti, anche la presenza di materia oscura non barionica avrebbe avuto serie difficoltà a far aggregare le strutture nel tempo a disposizione dalla ricombinazione a oggi. In questo caso, nulla avrebbe potuto salvare dalla crisi i modelli basati sull'instabilità gravitazionale.

Scovare le tracce lasciate dalla presenza dei semi cosmici nell'Universo primordiale era diventato assolutamente imperativo: i cosmologi cominciavano ad avvertire sinistri scricchiolii nella immensa impalcatura teorica messa in piedi in quasi un secolo di duro lavoro.

## Avanzi nel microonde

Il motivo per cui le fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo continuarono per decenni a sfuggire a ogni tentativo di misurazione era, banalmente, che si cercava il classico ago in un pagliaio. O, per dirla in modo più efficace, con le parole di George Smoot, era "come tentare di ascoltare un sospiro nel rumore di una festa in spiaggia, tra radio che strepitano, onde che si infrangono, gente che urla, cani che abbaiano e *dune-buggy* che rombano". L'analogia è particolarmente calzante, e rende molto bene l'idea del compito quasi impossibile che i cosmologi osservativi hanno dovuto fronteggiare nella lunga caccia alle evanescenti anisotropie.

La debolezza del segnale da rivelare è di per sé quasi disarmante. Come abbiamo visto, bisogna essere in grado di distinguere minuscole variazioni di temperatura, centinaia di migliaia di volte più piccole della temperatura media, che a sua volta è di soli 3 K circa. La radiazione cosmica di fondo è davvero estremamente uniforme. Provate a immaginare la cosa più liscia che vi viene in mente – una lastra di vetro, una sfera di metallo lucente, una superficie di marmo perfettamente levigato: tutte queste cose sono molto meno uniformi della radiazione cosmica di fondo. Se la Terra fosse altrettanto liscia, i rilievi più alti raggiungerebbero poche decine di metri: i panorami sarebbero piuttosto monotoni.

Per catturare le piccole imperfezioni della radiazione di fondo dobbiamo poi liberarci di un rumore particolarmente invadente e causato dalle sorgenti più disparate. Tanto per cominciare, c'è l'atmosfera terrestre che, a causa della presenza di vapore acqueo e ossigeno, emette radiazione elettromagnetica nelle microonde, esattamente come il fondo cosmico. La Terra stessa emette radiazione termica, seppure con un massimo di intensità in una banda diversa dalle microonde. Poi ci sono tutte le sorgenti astrofisiche che si frappongono tra noi e la radiazione di fondo, prima fra tutte la nostra stessa Galassia. La Via Lattea è una formidabile sorgente di radiazione elettromagnetica, non soltanto per via delle stelle che la compongono. Il disco galattico è pervaso da una polvere finissima, che costituisce circa il 10% della massa complessiva della nostra Galassia: microscopiche

particelle di materia solida, come silicio o grafite, che assorbono la luce emessa dalle stelle e la riemettono a lunghezze d'onda più basse. È proprio la presenza di questa polvere diffusa che ci impedisce di godere del magnifico spettacolo che sarebbe rappresentato dalla visione diretta del nucleo galattico, milioni di stelle raggruppate in un globo lattiginoso delle dimensioni del disco lunare a illuminare il nostro cielo notturno. Purtroppo, oltre a privarci di una possibile fonte di godimento estetico, la stessa polvere è deleteria anche per chi deve effettuare osservazioni nella banda delle microonde. Altri processi che avvengono nella Galassia, come la radiazione emessa da stormi di elettroni che si muovono a tutta velocità in immense spirali nel campo magnetico galattico, riducono la nostra capacità di osservare il fondo cosmico nella direzione del piano della Via Lattea. Ma anche sorgenti esterne alla nostra Galassia, come altre galassie lontane che emettono radiazione nella banda radio, possono causare disturbo e aumentare il livello di confusione. Infine, sono gli stessi strumenti che vengono utilizzati per tentare di rivelare le piccole fluttuazioni del fondo cosmico a generare al loro interno un continuo rumore, producendo un falso segnale in modo casuale, un fastidiosissimo crepitìo, dello stesso tipo di quello emesso da un ricevitore radio mal sintonizzato.

Per venire a capo del più grande mistero della cosmologia moderna, quindi, bisognava da un lato costruire rivelatori sempre più sofisticati e sensibili per catturare anche il più flebile segnale, introducendo nella misura il livello minimo di rumore possibile; dall'altro, si doveva tentare di rendere per quanto possibile irrilevante la presenza di sorgenti esterne di rumore, o almeno essere in grado, a posteriori, di separare il segnale reale dalle contaminazioni indesiderate. Nella lunga corsa per rivelare il residuo dei semi cosmici presenti nell'Universo primordiale, i vincitori sarebbero stati coloro che avrebbero trovato la strategia migliore per superare questi formidabili ostacoli.

La mossa decisiva la fece la NASA, che nel 1989 lanciò il satellite COBE, acronimo di *COsmic Background Explorer* (ovvero, esploratore del fondo cosmico). COBE (figura 3.4) era stato progettato appositamente per studiare la radiazione di fondo dallo spazio. Questo era un grosso salto di qualità rispetto a tutti gli altri esperimenti condotti fino a quel momento, che si erano

Figura 3.4: Il satellite COBE della NASA. Lanciato nel 1989, ha continuato a operare fino al 1993, osservando il cielo in orbita intorno alla Terra a circa 900 chilometri di quota. (Illustrazione COBE/NASA.)

svolti o a terra, o al massimo con apparati mandati in volo nelle zone più alte dell'atmosfera terrestre. L'unico altro tentativo di osservazione dallo spazio, l'esperimento sovietico Relikt, lanciato nel 1983 a bordo del satellite Prognoz 9, aveva confermato la presenza del dipolo ma non era stato in grado di ottenere prove certe della presenza di altre anisotropie.

A capo della missione COBE c'era una nostra vecchia conoscenza, George Smoot, e altri due ricercatori, John Mather e Mike Hauser. Smoot guidava il gruppo che avrebbe tentato di rivelare le fluttuazioni di temperatura servendosi di uno strumento chiamato DMR (*Differential Microwave Radiometer*, ovvero radiometro differenziale nelle microonde). Il DMR era una versione più sofisticata dello strumento già usato da Smoot per osservare l'anisotropia di dipolo, e un diretto discendente del radiometro inventato da Dicke negli anni quaranta e più tardi usato da Penzias e Wilson a Holmdel. Invece di misurare la temperatura assoluta in un certo punto del cielo, il DMR avrebbe

misurato differenze di temperatura tra due punti diversi, da cui il nome differenziale. Questo avrebbe permesso di aumentare la sensibilità della misura, distinguendo una genuina differenza di temperatura sul cielo da una differenza dovuta al rumore dello strumento. Mather e il suo gruppo avrebbero invece cercato di misurare la distribuzione energetica dei fotoni della radiazione di fondo, usando uno strumento chiamato FIRAS, per stabilire se essa fosse realmente identica a quella di un corpo nero a circa 3 K, come previsto dal modello del Big Bang. Infine, Hauser si sarebbe occupato di un'altra radiazione di fondo, quella nella banda dell'infrarosso, che ha una natura completamente diversa, essendo causata dalle emissioni dei primi oggetti luminosi formatisi nell'Universo, come stelle e galassie.

Osservare la radiazione cosmica di fondo dallo spazio comporta una serie di grossi vantaggi. Innanzitutto, permette di ridurre la contaminazione proveniente dall'emissione termica terrestre. Inoltre, l'assenza di atmosfera elimina completamente uno dei principali problemi legati all'osservazione nella banda delle microonde: si apre una finestra enorme per osservare diverse regioni dello spettro elettromagnetico, il che consente tra l'altro di distinguere molto meglio le sorgenti di contaminazione astrofisica dal genuino segnale primordiale. Infine, trovarsi in orbita nello spazio dà modo di osservare il cielo per tempi lunghissimi e in tutte le direzioni, da una posizione estremamente stabile, sfruttando il moto di rivoluzione per effettuare diverse ricognizioni complete della volta celeste. Poter osservare per tempi molto lunghi ha un'importanza cruciale: da un lato, rende la misura più sensibile, perché permette di raccogliere un numero maggiore di fotoni e quindi, in un certo senso, di aumentare l'intensità del segnale osservato; dall'altro, riosservando più e più volte lo stesso punto del cielo, si riduce di gran lunga il disturbo introdotto dallo strumento, perché si può separare il vero segnale, che è sempre lo stesso, dal rumore di fondo, che ha una natura casuale. Secondo le stime teoriche, COBE avrebbe potuto rivelare fluttuazioni nella radiazione di fondo centomila volte più piccole della temperatura media. Sulla carta, dunque, COBE aveva tutte le carte in regola per risolvere una volta per sempre il mistero dei semi cosmici. In un certo senso, questa era l'ultima spiaggia per lo scenario di formazione di strutture basa-

to sull'instabilità gravitazionale. Se anche COBE avesse fallito, il modello cosmologico che fino a quel momento aveva resistito tanto bene alla prova del tempo avrebbe subito un duro colpo: forse fatale.

Man mano che i dati andavano accumulandosi, il *team* di COBE li analizzava, escludendo via via la presenza di fluttuazioni a livelli di precisione sempre crescente. Dapprima fu scartata la possibilità di fluttuazioni di un millesimo rispetto alla media; poi non venne trovata traccia di fluttuazioni neanche a livello di una parte su diecimila. Il tempo passava e la *suspence* cresceva. La comunità scientifica aspettava letteralmente con il fiato sospeso l'esito dell'analisi dei dati di COBE, e ogni mese di ritardo nell'annuncio dei risultati aumentava la sensazione che dei fantomatici semi cosmici non vi fosse neanche l'ombra. Apparentemente l'origine delle galassie era avvenuta senza lasciare alcuna traccia.

Mentre in lontananza cominciavano a risuonare i primi cupi rintocchi per il modello di formazione delle strutture cosmiche, all'interno del gruppo di COBE si stava vivendo un vero e proprio psicodramma. I primi segni della presenza di fluttuazioni stavano infatti cominciando ad affiorare dai dati, ma l'enorme pressione a cui erano sottoposti gli scienziati, immersi in interminabili e complesse verifiche necessarie a stabilire la correttezza dei risultati ottenuti, ne stava mettendo a dura prova i nervi. Il *team* era più o meno spaccato in due tra quelli che spingevano per la pubblicazione immediata dei risultati e quelli che volevano sottoporli a ulteriore scrutinio. Per ottenere il massimo livello di attenzione tra i membri del suo gruppo, Smoot arrivò a offrire come premio un biglietto aereo per una destinazione a scelta a chiunque avesse trovato un errore nell'analisi.

Finalmente, nel 1992, tre anni dopo il lancio, al congresso annuale della American Physical Society, il *team* di COBE annunciò di aver finalmente scoperto quello che i cosmologi avevano disperatamente cercato per i due decenni precedenti: il DMR aveva scandagliato il fondo dell'Universo e aveva rivelato, sepolte sotto strati e strati di rumore, minuscole fluttazioni nella temperatura della radiazione cosmica a microonde, della grandezza giusta per salvare la pericolante teoria dell'instabilità gravitazionale e per spiegare la formazione delle strutture cosmiche (figura

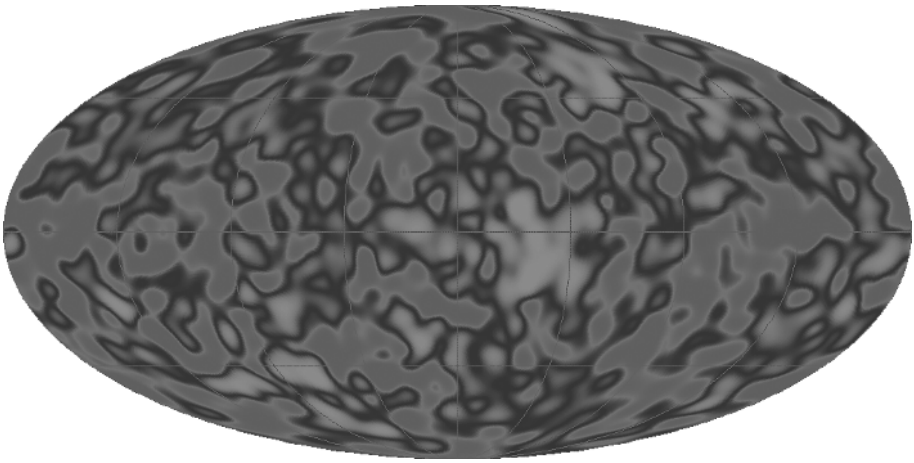


Figura 3.5: La mappa delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo ottenuta dal satellite COBE. L'intera volta celeste è raffigurata in proiezione di Mollweide, con il piano della nostra Galassia (che è stata rimossa dall'immagine durante l'analisi) allineato lungo la dimensione orizzontale. (COBE/NASA)

3.5). I semi cosmici esistevano. Dopo anni e anni di tenaci ricerche, e proprio quando tutto sembrava sul punto di crollare, i cosmologi, diversamente dai cavalieri templari, avevano visto ripagata la loro dedizione e avevano finalmente trovato il loro Santo Graal.

L'impatto della scoperta fu enorme, non solo a livello scientifico, e scatenò un insolito circo mediatico. Dopotutto, cosa c'è di più affascinante dell'aver catturato piccole increspature nella debole luce emessa dall'Universo neonato? Televisioni e giornali fecero a gara per coprire la notizia e per intervistare i membri del gruppo di COBE. Uno degli scienziati più noti presso il grande pubblico, Stephen Hawking, affermò che quella di COBE era "la scoperta scientifica del secolo, se non di tutti i tempi". Smoot ci mise del suo per accendere gli animi, affermando in un'intervista che osservare le immagini ottenute da COBE, "se si è religiosi, è come vedere il volto di Dio". Ci fu chi tirò in ballo la Genesi, chi la "firma del Creatore" e via di questo passo. I dibattiti si sprecarono.

Anche spogliati dei loro aspetti metafisici, comunque, i ri-

sultati di COBE furono davvero rivoluzionari. Se le anisotropie osservate da COBE fossero state solo due volte più piccole, spiegare la formazione di strutture cosmiche nell'ambito del modello del Big Bang sarebbe stato arduo. Lo strumento DMR salvò la teoria basata sull'instabilità gravitazionale proprio nel momento in cui stava barcollando sotto i colpi dei critici. Ma, andando a investigare più da vicino le scoperte di COBE, vediamo che il computo dei successi non si ferma qui.

Le anisotropie osservate da COBE sembravano essere associate proprio al tipo di semi cosmici ipotizzati da Harrison e Zel'dovich. Tra tutti i possibili modi in cui potevano realizzarsi, le perturbazioni primordiali sembravano aver scelto proprio quello previsto dall'inflazione. Sebbene di per sé questa non fosse ancora una prova diretta della sua validità, l'inflazione usciva però molto rafforzata dai risultati di COBE. Non male, per una teoria che solo pochi anni prima era sembrata poco più di un'audace speculazione.

Inoltre, l'esperimento FIRAS a bordo di COBE misurò per la prima volta la distribuzione energetica della radiazione di fondo e provò indiscutibilmente che si trattava proprio di quella di un corpo nero, esattamente come previsto dal modello del Big Bang (figura 3.6). Anzi, le misure di FIRAS mostrarono che la radiazione di fondo è quella di un corpo nero di tale perfezione che non ne esistono equivalenti in natura. Anche la temperatura del corpo nero fu misurata da FIRAS con un'incredibile accuratezza: 2,725 K (con un margine di errore di 0,001 K). Quando nel 1990 questo risultato fu presentato per la prima volta al congresso della American Astronomical Society, gli scienziati presenti si alzarono in piedi e proruppero in una spontanea ovazione: un evento piuttosto raro in un congresso scientifico. Il fatto che la radiazione cosmica di fondo abbia in effetti una distribuzione di corpo nero è uno dei successi più straordinari del modello del Big Bang. Non esiste alcun altro modello plausibile che possa spiegare un'osservazione di questo tipo.

È impossibile sottovalutare l'enorme importanza dei risultati di COBE. Di certo, la loro rilevanza non è sfuggita ai membri dell'Accademia Reale delle Scienze Svedese che nel 2006 hanno assegnato a John Mather e a George Smoot il premio Nobel per la fisica.

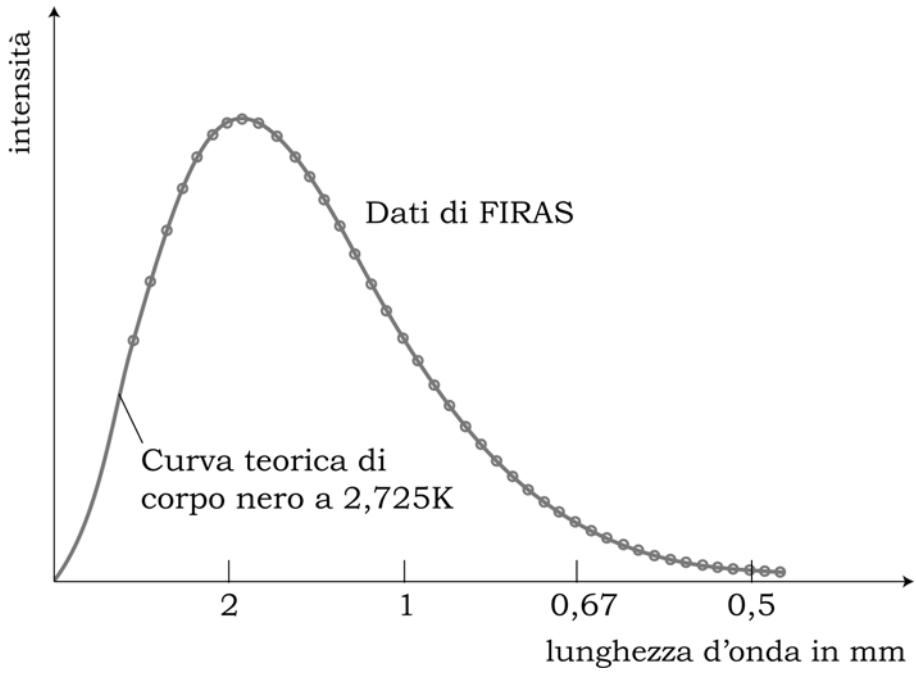



Figura 3.6: La distribuzione energetica della radiazione cosmica di fondo misurata dallo strumento FIRAS a bordo del satellite COBE. Le misure (punti) si sovrappongono perfettamente alla curva teorica corrispondente a un corpo nero a una temperatura di 2,725 K. La misura di FIRAS è talmente accurata che gli errori sperimentali non sono visibili alla scala di questo grafico. (Figura adattata da un articolo del 1996 di D. Fixsen e collaboratori)

Il clamoroso successo di COBE diede un impulso fortissimo alla ricerca nel campo della radiazione cosmica di fondo. I cosmologi acquisirono maggiore fiducia nella possibilità di ottenere risposte accurate alle domande sulla natura dell'Universo. Il quadro generale era uscito rafforzato, ma alcune domande restavano ancora senza risposta. L'inflazione, ad esempio, sembrava avere le carte in regola per produrre proprio il tipo di perturbazioni osservate da COBE: ma era possibile avere qualche evidenza più convincente? E poi: l'Universo è davvero piatto? E qual è il ruolo della materia oscura nel bilancio cosmico? Il cammino era ancora lungo, ma la strada intrapresa sembrava quella corretta.

# ·4·

# MUSICA DELLE SFERE

*"Ma che suono è questo, così intenso e armonioso, che riempie le mie orecchie?". "È il suono – rispose – che sull'accordo di intervalli regolari, eppure distinti da una razionale proporzione, risulta dalla spinta e dal movimento delle orbite stesse e, equilibrando i toni acuti con i gravi, crea accordi uniformemente variati; del resto, movimenti così grandiosi non potrebbero svolgersi in silenzio, e la natura richiede che le due estremità risuonino, di toni gravi l'una, acuti l'altra."*

Marco Tullio Cicerone, *Somnium Scipionis*

Giovanni Keplero è considerato a buon diritto uno dei padri della scienza moderna: a lui dobbiamo tra l'altro la formulazione delle leggi che descrivono il moto dei pianeti del Sistema Solare. Nel 1619 il grande astronomo tedesco diede alle stampe un trattato la cui stesura lo aveva tenuto impegnato per oltre venti anni: l'*Harmonices Mundi* (L'armonia del mondo). Per Keplero, l'*Harmonices Mundi* rappresentava la sintesi del lavoro di una vita, un condensato del suo pensiero filosofico e scientifico, in cui confluiva tutto il sapere accumulato nel corso delle sue lunghe ricerche. Il nucleo centrale dell'*Harmonices Mundi* era il tentativo di dimostrare, sulla base dei dati raccolti in anni di rigorose osservazioni dei fenomeni celesti, l'esistenza di connessioni tra le leggi del moto dei pianeti e i rapporti numerici tra gli intervalli musicali. Riprendendo idee care a Pitagora e a Platone, e di cui

si trovano tracce lungo tutta la storia del pensiero medioevale, Keplero cercava di dare basi scientifiche al concetto di "musica delle sfere", l'idea secondo la quale ogni pianeta, nel suo moto intorno al Sole, produce un suono ben preciso. Secondo Keplero, la particolare nota musicale emessa doveva essere legata al periodo dell'orbita. Le orbite dei pianeti non potevano quindi essere casuali, ma dovevano rispondere a precisi rapporti numerici, gli stessi che governano le leggi dell'armonia musicale, e che consentono di distinguere un accordo piacevole all'udito da uno dissonante. Inoltre, siccome le orbite non sono perfettamente circolari, ma ellittiche (un fatto scoperto proprio da Keplero) la velocità dei pianeti doveva variare leggermente lungo il percorso intorno al Sole, e di conseguenza la nota emessa doveva modulare, producendo un vero e proprio motivo musicale. Ecco un saggio delle conclusioni di Keplero: "La Terra canta *Mi*, *Fa*, *Mi*: potete dedurre persino dalle sillabe che in questo nostro mondo non vi è che *Mi*seria e *Fa*me".

L'*Harmonices Mundi*, a cui Keplero attribuiva un'importanza ben maggiore che a ogni sua altra opera, appare agli occhi di uno scienziato moderno un insieme difficilmente digeribile di speculazioni filosofiche e divagazioni misticheggianti, in cui precise tavole numeriche basate su indagini approfondite sono intervallate a bizzarre partiture musicali, e visioni fantastiche sono interrotte da lucide deduzioni matematiche. Oggi è considerato poco più di una curiosità e forse sarebbe stato completamente ignorato dalla storia della scienza se al suo interno non si trovasse la deduzione corretta della terza legge del moto dei pianeti, che lega la distanza dal Sole al periodo dell'orbita. Ma alla base del singolare trattato del Keplero maturo c'era comunque una sensazione che arriva da lontano e che pervade una grande parte del pensiero scientifico occidentale: l'idea che il mondo sia governato da leggi perfette e immutabili, che l'Universo sia sede di fenomeni regolari e comprensibili attraverso l'uso della ragione e della logica, e che la natura sia in fondo pervasa da un ordine soggiacente, persino da una bellezza estetica, che la scienza deve incaricarsi di svelare. Un'armonia, appunto. La stessa parola "Cosmo", che oggi usiamo come sinonimo di "mondo" o di "Universo", in origine voleva dire "ordine".

Keplero sarebbe stato probabilmente felice di sapere che la

cosmologia del XXI secolo ha ricominciato a fare ricorso a metafore musicali per illustrare in modo intuitivo le sue scoperte più recenti. Quando hanno approfondito la loro indagine sulle condizioni fisiche esistenti nell'Universo primordiale, i cosmologi si sono resi conto che esso era davvero attraversato da vibrazioni del tutto simili a quelle prodotte da suoni che viaggiano nell'aria. Cessati ormai da miliardi di anni, persi nel vuoto e nella vastità dello spazio, questi suoni hanno lasciato la loro traccia scolpita nella struttura fine della radiazione cosmica di fondo. Capire i meccanismi che li hanno prodotti, quali informazioni si celano nella loro configurazione, e come queste informazioni possono essere riportate alla luce, è stato un aspetto cruciale della ricerca cosmologica degli ultimi decenni.

## Suoni e numeri

Nei ricordi scolastici della maggior parte di noi, Pitagora è quel vecchio signore barbuto che ci ha tormentato per anni con la storia dei quadrati costruiti sui cateti e sull'ipotenusa. In realtà, il grande filosofo greco, vissuto 2500 anni fa, è un personaggio dai contorni assai più ricchi. Una figura misteriosa, quasi mitologica, l'iniziatore di una vera e propria setta. I suoi seguaci ce lo hanno tramandato come una persona depositaria di una saggezza senza limiti e di capacità quasi magiche.

Secondo una delle tante leggende che circolano sul suo conto, Pitagora stava passando dalle parti della bottega di un fabbro quando fu attratto dal modo in cui i martelli risuonavano nel colpire le incudini. Le armonie casualmente prodotte dal picchiare degli arnesi gli diedero l'ispirazione per una delle sue straordinarie intuizioni. Precipitatosi nella bottega, Pitagora si convinse che il tono musicale emesso da ogni martello era legato in maniera molto precisa al peso del martello stesso.

Questo aneddoto è sicuramente stato inventato di sana pianta da uno dei tanti discepoli adoranti di Pitagora. Il suono emesso da un martello (sempre che esso emetta qualcosa di simile a una nota musicale, cosa perlomeno discutibile) non ha infatti alcuna relazione con il suo peso, quanto piuttosto con le sue dimensioni. Quello che c'è di importante, però, è che Pitagora

viene riconosciuto come colui che per la prima volta stabilì una relazione matematica tra i suoni musicali, dimostrando che l'armonia che percepiamo con le orecchie quando ascoltiamo una sinfonia è, in ultima analisi, una questione di precisi rapporti numerici. Il modo in cui presumibilmente il filosofo arrivò a questa conclusione fu attraverso l'uso di un semplice strumento, una sola corda tenuta tesa alle due estremità: il *monocordo*, appunto.

La storia deve essere andata più o meno così. Il monocordo di Pitagora doveva avere un ponticello mobile, che permetteva di dividere la lunghezza della corda in due parti di lunghezza variabile. Pitagora cominciò a sperimentare diverse posizioni del ponticello, ascoltando ogni volta la nota emessa pizzicando la corda. Usò come nota di riferimento quella prodotta dalla corda lasciata libera di vibrare per tutta la sua lunghezza, con il ponticello fisso a un'estremità: questa era la nota fondamentale del monocordo. Poi cominciò a muovere su e giù il ponticello, confrontando le note emesse con quella iniziale. Si accorse ben presto che, tra tutte le possibili posizioni del ponticello, alcune erano speciali. Solo quando il ponticello divideva la corda in parti intere le note prodotte si accordavano piacevolmente con la nota fondamentale del monocordo. Tutte le altre posizioni producevano note che erano irrimediabilmente stonate.

Quando il ponticello divideva la corda a metà, si otteneva esattamente la nota fondamentale del monocordo, ma più acuta: è quello che in musica si chiama un intervallo di *ottava* (perché si ottiene salendo otto gradini nella scala delle note, per esempio Do Re Mi Fa Sol La Si Do). Questa era la massima armonia possibile, il tipo di intervallo che si produce naturalmente quando un uomo e una donna cantano insieme la stessa melodia. Se la corda veniva divisa in una parte da un terzo e in una da due terzi, e si pizzicava la parte lunga un terzo, si otteneva un intervallo di quinta (cioè quello che passa tra cinque tasti bianchi di un pianoforte, ad esempio tra Do e Sol) al di sopra della prima ottava, e così via. Pitagora aveva fatto una scoperta sorprendente. Si potevano ottenere tutte le note della scala musicale dividendo la lunghezza di una corda per la sequenza dei numeri interi. Il fatto che i suoni fossero piacevoli all'orecchio rifletteva quindi un'armonia di tipo più fondamentale, non legata al gu-

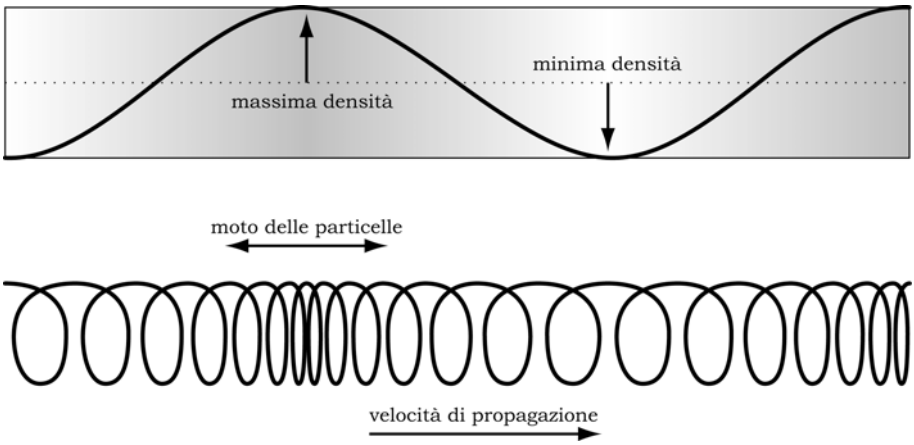



Figura 4.1: Un'onda sonora si propaga in un mezzo nella stessa direzione in cui avviene l'oscillazione, in modo analogo a una molla che viene compressa. In ogni punto del mezzo si alternano, col passare del tempo, fasi di compressione e di rarefazione, rappresentati nella figura rispettivamente come zone più scure e più chiare.

sto dell'ascoltatore ma a un principio matematico perfetto. La coincidenza tra bellezza estetica e verità matematica gli sembrò talmente profonda da fargli fare l'affermazione per la quale è passato alla storia: "Tutto è numero".

L'esistenza di rapporti matematici tra i diversi toni musicali è una conseguenza diretta della natura ondulatoria del suono. Ogni suono ha origine da una vibrazione trasmessa a un mezzo, generalmente l'aria, attraverso la propagazione di *onde acustiche*. Se potessimo osservare il passaggio di un'onda acustica, vedremmo le molecole che compongono l'aria oscillare avanti e indietro lungo la direzione di propagazione dell'onda, come le spighe in un campo di grano dopo una breve raffica di vento. Quando viene attraversata da un suono, l'aria in un punto fisso dello spazio subisce una sequenza di successive compressioni e rarefazioni, diventa cioè alternativamente più o meno densa. La separazione spaziale tra due zone di massima compressione (o di massima rarefazione) dell'aria è legata alla lunghezza dell'onda, e quindi al tono caratteristico del suono (figura 4.1).

In termini fisici, quindi, la scoperta di Pitagora ha un'interpretazione immediata. Infatti, una corda tesa, quando viene piz-

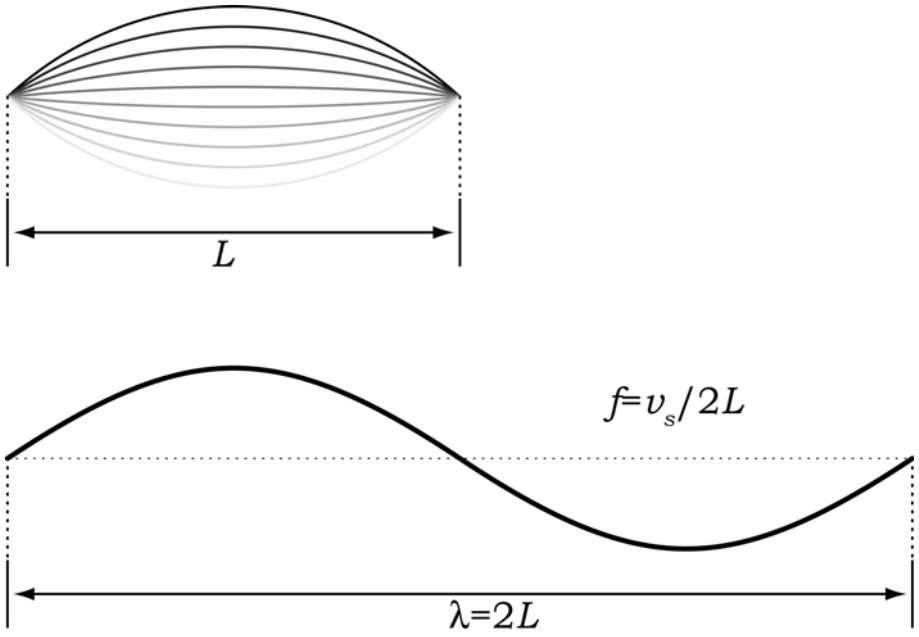



Figura 4.2: Quando una corda viene messa in vibrazione, si produce nell'aria un'onda acustica con lunghezza d'onda doppia della lunghezza della corda.

zicata, produce un'onda acustica con una lunghezza d'onda pari al doppio della sua lunghezza (figura 4.2). La frequenza dell'onda acustica sarà, a sua volta, data dalla velocità di propagazione del suono nel mezzo (nel caso dell'aria, in condizioni normali, circa 340 metri al secondo) divisa per la lunghezza d'onda. È il valore della frequenza che stabilisce con esattezza quale sarà il tono che ascoltiamo, cioè la nota musicale emessa dalla corda vibrante. Una corda identica, tesa con la stessa forza, ma lunga la metà, produrrà un'onda acustica di frequenza doppia, ed emetterà la nota corrispondente all'intervallo di ottava. L'onda prodotta da una corda lunga un terzo avrà una frequenza tripla, e così via.

Se nel caso di una corda vibrante è possibile stabilire una facile connessione tra tono e frequenza, le cose non sono altrettanto semplici per un suono qualsiasi, come il boato di una folla o il rombo di un motore. In effetti, sono ben pochi i suoni rea-

li che possano essere descritti da una sola frequenza (e, come vedremo tra breve, non è questo il caso neanche per una corda vibrante). Alcuni suoni ci vanno molto vicini, ad esempio il suono emesso da un diapason. Esistono generatori elettronici che riescono a produrre suoni puri: un'onda che oscilla esattamente alla frequenza desiderata. Si dà il caso, però, che questi suoni siano tra i meno interessanti che sia dato ascoltare. Una specie di sibilo monotono e nient'altro.

La maggior parte dei suoni, invece, è il risultato del mescolamento di tantissime onde acustiche elementari, ognuna con una sua frequenza caratteristica. Quello che dà a un suono la sua impronta riconoscibile, il suo *timbro* particolare, è proprio il fatto di essere composto non da una sola onda, ma da tante onde contemporaneamente. In un rumore, le frequenze delle onde sono del tutto arbitrarie, senza alcuna particolare relazione tra loro. Al contrario, nei suoni più piacevoli le diverse frequenze stanno in precisi rapporti matematici l'una con l'altra: ed è proprio questa armonia sottostante ciò che rende il suono gradevole all'udito.

Nel caso di una nota suonata da uno strumento musicale, le frequenze che compongono il suono seguono regole abbastanza rigide. Il tono della nota (per intenderci, il suo nome, ovvero il fatto che sia un Do o un La) è legato al valore della cosiddetta *frequenza fondamentale*, cioè la frequenza dell'onda più intensa e direttamente avvertibile. Le altre onde che compongono il suono, meno intense ma molto importanti per la definizione del timbro, hanno frequenze più alte, dette *armoniche*, che sono multipli della frequenza fondamentale. In questo senso, le armoniche non sono altro che le frequenze scoperte da Pitagora sul monocordo, ma vengono prodotte tutte simultaneamente, seppure con intensità diverse. È l'esatta distribuzione delle armoniche che si accompagnano alla frequenza fondamentale, il loro peso relativo, ad arricchire e a rendere ben riconoscibile il suono prodotto da uno strumento musicale. Ecco cosa permette di distinguere il suono di uno Stradivari da quello di un violino scadente, il Do emesso da un flauto dallo stesso Do suonato da un trombone o da una chitarra, o la voce di Ella Fitzgerald da quella di Louis Armstrong.

Il tipo e la quantità di armoniche prodotte sono inoltre inti-

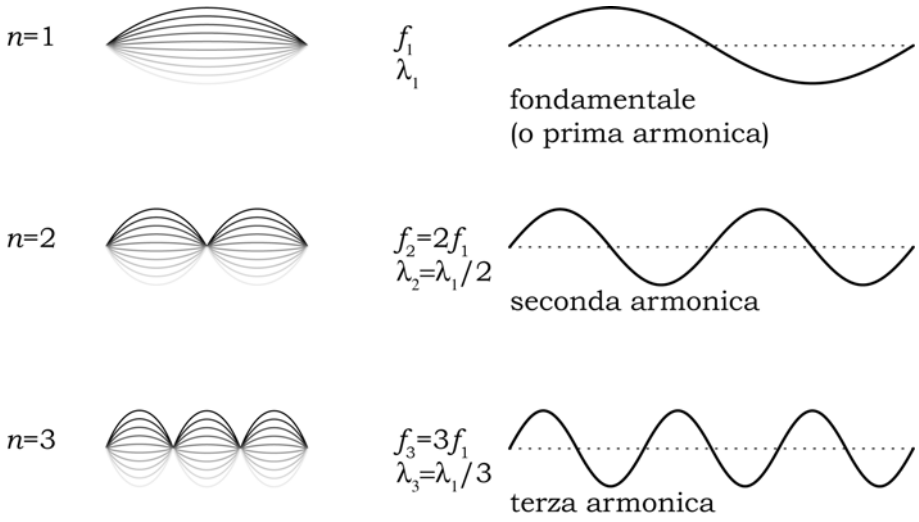



Figura 4.3: Ogni corda vibrante produce una serie (teoricamente infinita) di onde acustiche: oltre a quella fondamentale (che ha lunghezza d'onda doppia della lunghezza della corda), vengono emesse onde a frequenze crescenti (dette armoniche), multiple di quella fondamentale.

mamente legate alle caratteristiche fisiche dello strumento, alla sua forma, al modo in cui è stato costruito. Ad esempio, quando una corda vibra, essa produce non solo l'onda a frequenza fondamentale (quella più bassa possibile, data la lunghezza della corda) ma anche tutte le possibili armoniche (figura 4.3). Le frequenze armoniche sono stabilite dal rigido vincolo imposto dal fatto che gli estremi della corda sono fissati. La corda può infatti vibrare solo in modo tale da non muoversi alle estremità, e questo è compatibile solo con valori della frequenza che siano multipli esatti della fondamentale.

In altri strumenti musicali si hanno altri tipi di vincolo che producono altri insiemi di armoniche. In una canna d'organo aperta alle due estremità, ad esempio, l'aria vibra in modo completamente diverso da quello della corda, ma il risultato è comunque quello di produrre tutte le armoniche multiple della fondamentale. Il vincolo in questo caso è rappresentato dal fatto che l'aria alle estremità della canna deve avere un valore di pressione e densità uguale a quello dell'atmosfera esterna. Se

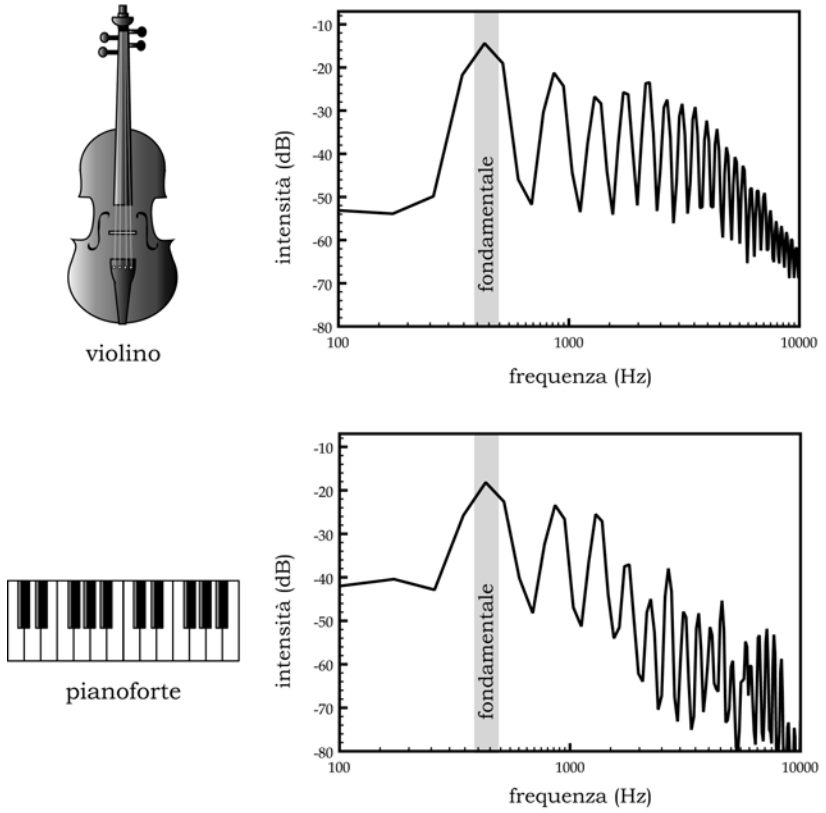



Figura 4.4: Lo spettro di due strumenti musicali che emettono la stessa nota (per esempio un La) mostra il contributo, diverso e caratteristico per ciascuno strumento (timbro), delle armoniche che accompagnano la frequenza fondamentale.

invece uno dei due lati della canna è chiuso, come avviene nel caso del clarinetto, solo la densità dell'aria nel lato aperto dovrà ancora mantenersi uguale a quella dell'atmosfera. Questo vincolo fisico porta a escludere tutte le armoniche pari, dando vita a un timbro di qualità differente.

Se costruiamo un grafico che riporti l'intensità delle diverse onde che compongono un certo suono in funzione della frequenza delle onde stesse (il cosiddetto *spettro*), avremo a disposizione una vera e propria carta d'identità di quel suono, una specie di fotografia del suo timbro caratteristico: una fotografia profon-

damente rivelatrice della natura fisica dello strumento che ha emesso il suono, e praticamente impossibile da falsificare (figura 4.4). L'indagine dello spettro sonoro viene usata, ad esempio, nelle moderne tecniche di identificazione vocale. Ogni voce ha un suo spettro caratteristico che la rende unica e distinguibile da tutte le altre. Anche se non ne siamo consapevoli, il nostro cervello compie in continuazione un'analisi molto raffinata dello spettro dei suoni che colpiscono le nostre orecchie, permettendoci ad esempio di separare i diversi strumenti in un'orchestra, o di distinguere persone diverse in base al tono della voce.

In fisica, la complicata arte di ottenere informazioni su un suono, scomponendolo nelle frequenze che lo costituiscono e osservandone lo spettro, va sotto il nome di *analisi armonica*. Le basi matematiche per questo tipo di indagine furono gettate nel XIX secolo dal matematico francese Joseph Fourier e oggi sono uno strumento indispensabile che trova applicazione non solo nello studio dei fenomeni acustici, ma anche in moltissimi altri campi della fisica. Come vedremo nel seguito, proprio i trucchi dell'analisi armonica, applicati allo studio delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo, hanno giocato un ruolo cruciale nella ricerca cosmologica degli ultimi decenni. Intanto, cerchiamo di capire se i suoni e la musica hanno davvero qualcosa a che fare con la natura del nostro Universo, e perché.

## Sinfonie cosmiche

"Nello spazio nessuno può sentirti urlare": era lo slogan di un celebre film *fanta-horror* di parecchi anni fa. In effetti, al contrario delle onde elettromagnetiche, le onde acustiche hanno bisogno di un mezzo all'interno del quale propagarsi. La vibrazione provocata dalle onde acustiche è di tipo meccanico, e all'emissione di un suono si deve accompagnare una variazione nella densità del mezzo che lo trasporta. I suoni che ascoltiamo in condizioni normali si propagano nell'aria che ci circonda, ma essi possono viaggiare altrettanto bene in altri mezzi: ad esempio, sarà capitato a molti di percepire dei rumori dopo aver immerso la testa nell'acqua del mare.

L'Universo oggi è per lo più desolantemente vuoto, e quindi silenzioso. Le roboanti esplosioni di navi stellari nello spazio siderale a cui ci hanno abituato i film di fantascienza sono certo un piacevole ingrediente spettacolare, ma non hanno alcun fondamento fisico. Non c'è alcun modo per un'onda acustica di propagarsi nelle vastità del Cosmo attuale, semplicemente perché non c'è un mezzo abbastanza denso da poter trasportare la vibrazione dell'onda.

Ma nel Cosmo primordiale, la situazione era molto diversa. Abbiamo visto che l'Universo dopo il Big Bang era riempito di plasma denso ed estremamente uniforme. Un mezzo potenzialmente ideale per trasportare sollecitazioni da un punto all'altro dello spazio. Forse l'Universo primordiale è stato sede di una "musica delle sfere"? E se c'erano suoni, erano canti armoniosi del tipo di quelli vagheggiati da Keplero o un rumore incoerente e assordante?

Le basi fisiche per rispondere a questa domanda furono gettate nei primi anni del XX secolo da un matematico e fisico inglese, Sir James Jeans. Tra i molti contributi forniti da Jeans alla comprensione dei fenomeni naturali, c'è lo studio del comportamento dei gas in varie condizioni fisiche. In particolare, Jeans si chiese cosa succede a una nube di gas lasciata libera di evolvere sotto l'influsso della sua stessa attrazione gravitazionale. La nostra esperienza comune è che un gas tende a espandersi sotto la spinta della propria pressione: ma se la nube è sufficientemente massiccia (o se la pressione non è abbastanza forte) essa può addensarsi, collassando sotto il proprio stesso peso.

Questo è esattamente il meccanismo di instabilità gravitazionale che abbiamo illustrato nel capitolo precedente e che serve a spiegare la formazione delle strutture cosmiche. In effetti, la possibile applicazione della teoria del collasso dei gas allo studio dell'Universo fu notata per la prima volta proprio da Jeans, che la usò per tentare di spiegare la formazione delle stelle in seguito all'accrescimento di una nube di materia.

Un risultato interessante trovato da Jeans è che a un certo punto, durante il collasso della nube, si raggiunge una situazione critica in cui la resistenza esercitata dalla pressione controbilancia perfettamente l'attrazione gravitazionale del gas. Quando ciò accade, la caduta del gas su se stesso si arresta, e la spin-

ta della pressione fa invertire il moto. Il gas comincia quindi a espandersi, ma l'espansione provoca una diminuzione della pressione, e la gravità ricomincia a dominare, ripristinando la tendenza al collasso. In questa situazione di quasi equilibrio, la nube comincia in un certo senso a rimbalzare su se stessa, con un ritmico alternarsi di fasi di espansione e di compressione.

Come abbiamo visto, le fluttuazioni nella densità di materia disseminate alla fine dell'inflazione sono i semi intorno a cui si formano lentamente le grandi strutture che osserviamo nell'Universo attuale. Il collasso gravitazionale che porta la materia ad addensarsi intorno ai grumi iniziali, però, non avviene sempre nel modo inesorabile che potremmo essere portati a immaginare. Abbiamo infatti finora trascurato il ruolo importantissimo giocato dalla radiazione elettromagnetica nell'Universo primordiale. Questo ruolo è del tutto analogo a quello svolto dalla pressione del gas nel modello di Jeans.

Il mare di fotoni che pervade l'Universo primordiale, infatti, ostacola i tentativi compiuti dalla forza di gravità di far collassare la materia intorno a una regione più densa della media. I fotoni sono, come ormai sappiamo, presenze molto scomode per i sogni di unione della materia. Abbiamo già visto come i loro continui urti con gli elettroni del plasma impediscano per lungo tempo che questi si congiungano ai nuclei per formare atomi neutri. In maniera analoga, quando una regione di plasma di densità maggiore della media inizia ad addensarsi sotto la spinta della gravità, i fotoni tendono a impedire il collasso attraverso la loro frenetica interazione con gli elettroni liberi.

La resistenza opposta dai fotoni, analogamente a quella della pressione in un gas, mette quindi in moto delle oscillazioni nel plasma primordiale. Ogni perturbazione di densità pulsa ritmicamente, combattuta tra la spinta gravitazionale che la porta a diventare ancora più densa, e la pressione della radiazione elettromagnetica che la spinge a espandersi verso l'esterno.

Questo balletto va avanti fino alla ricombinazione. Quando si formano gli atomi e la materia diventa elettricamente neutra, la radiazione perde qualsiasi potere di arrestare la forza accentratrice della gravità. I fotoni, infatti, interagiscono in modo molto meno efficace con la materia priva di carica elettrica. La materia, venendo a mancare la resistenza opposta dalla radiazione,

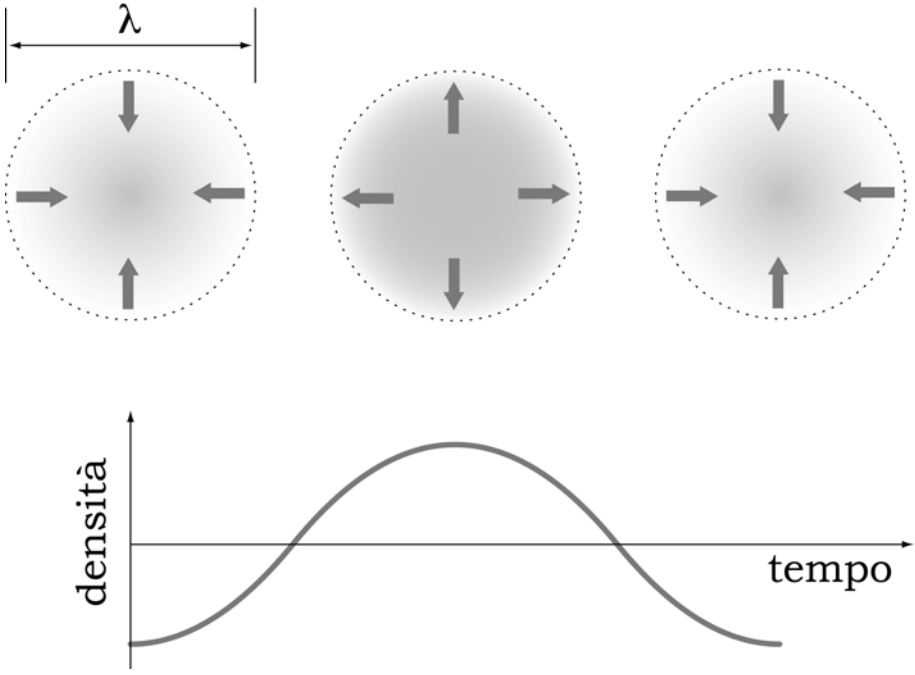



Figura 4.5: L'andamento della densità in una regione sferica di raggio $\lambda$ sotto l'influenza della gravità (che tende ad accrescere la densità) e della pressione (che si oppone alla crescita), segue un andamento di tipo oscillatorio, analogo a quello prodotto da un'onda acustica.

può cominciare ad addensarsi in strutture; la radiazione se ne va invece per conto suo, ma mantiene la traccia dello stato delle oscillazioni al momento della ricombinazione: i fotoni della radiazione cosmica di fondo appariranno più caldi o più freddi a seconda che si siano separati dalla materia mentre essa si trovava in una fase di compressione oppure di rarefazione.

La natura delle oscillazioni che hanno luogo nel plasma primordiale è in tutto e per tutto simile alle variazioni di densità provocate dal passaggio di un suono nell'aria. La presenza di perturbazioni di densità e la competizione tra gravità e pressione hanno come effetto la produzione di vere e proprie onde acustiche nell'Universo prima della ricombinazione (figura 4.5). In effetti, i cosmologi si riferiscono alle variazioni periodiche di densità del plasma primordiale proprio con il termine *oscillazioni*

*acustiche*.

La frequenza di un'onda, come sappiamo, è inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda. Nel caso delle onde acustiche presenti nel plasma primordiale, la lunghezza d'onda è legata alla dimensione caratteristica della perturbazione corrispondente. Questo significa che le onde acustiche corrispondenti a frequenze più basse sono associate a perturbazioni di dimensioni maggiori di quelle corrispondenti a frequenze maggiori. Il quadro intuitivo è abbastanza chiaro: proprio come la vibrazione di una corda più lunga genera un tono più grave, così una perturbazione che coinvolge una regione di plasma di dimensioni maggiori produce un'onda acustica di frequenza più bassa.

Esplorando i primi istanti di vita dell'Universo, i cosmologi si sono dunque imbattuti in una sorprendente rivelazione: il plasma primordiale è stato sede di onde simili a quelle che i suoni producono nell'aria che ci circonda, increspature che si susseguivano da un punto all'altro dello spazio, accompagnando l'evoluzione cosmica con un ricco coro di voci. Il disturbo prodotto nella densità del plasma da perturbazioni di diverse dimensioni si trasmetteva sotto forma di vibrazioni di frequenza diversa: perturbazioni più estese producevano oscillazioni più lente, di frequenza minore, toni bassi e profondi; perturbazioni su scale più piccole producevano invece onde di frequenza maggiore, i toni più acuti dell'orchestra primordiale. Keplero aveva cercato l'armonia delle sfere nel posto sbagliato. I cosmologi del XX secolo hanno ricominciato a cercare la musica dell'Universo, scavando negli abissi del tempo per portare alla luce partiture più antiche di ogni immaginazione.

È singolare che sia stata proprio la fisica di James Jeans a fornire ai cosmologi, molti anni dopo la sua morte, gli strumenti per scoprire l'esistenza di onde acustiche nel plasma primordiale. Grande appassionato di musica, e organista di un certo talento, Jeans scrisse nel 1938 anche un trattato su scienza e musica. Nel suo libro *The Mysterious Universe*, del 1930, Jeans sintetizzava in questo modo il suo punto di vista estetico sull'Universo: "Le leggi a cui la natura obbedisce, più che a quelle che governano il moto di una macchina, mi sembrano somigliare a quelle cui deve sottostare un musicista nello scrivere una fuga".

## Ascoltare con gli occhi

È una delle beffarde ironie della storia che Ludwig van Beethoven, uno dei più grandi geni musicali di tutti i tempi, abbia dovuto combattere per buona parte della sua vita con un udito molto debole. Possiamo solo immaginare l'enorme sofferenza che deve avergli provocato questa menomazione. Verso la fine della sua esistenza, quando scrisse i suoi ultimi capolavori, Beethoven era ormai completamente sordo. La musica che componeva viveva nella sua testa, prendeva forma nelle partiture che scriveva, ma egli non aveva modo di ascoltare il risultato delle sue creazioni. Durante la prima esecuzione della Nona Sinfonia, Beethoven diresse l'orchestra senza essere in grado di percepire il benché minimo suono. Tentò in qualche modo di seguire lo scorrere della musica osservando attentamente il movimento dell'archetto sulle corde dei violini, ma dovette essere comunque aiutato nella conduzione da un assistente. Al termine, non si accorse dell'ovazione tributata dal pubblico entusiasta, e fu fatto girare di forza verso la platea. Solo guardando i volti della gente poté ricostruire l'impatto emotivo provocato dalla sua creazione.

Quale che fosse il suono che riecheggiava nell'Universo primordiale, non c'era nessun orecchio ad ascoltarlo. E anche se ci fosse stato, non avrebbe sentito nulla. I moti della materia avvenivano infatti su scale gigantesche, e le increspature prodotte nel plasma dall'oscillazione delle perturbazioni avevano dimensioni enormi. Le onde acustiche viaggiavano in un mezzo ben diverso dall'aria a cui siamo abituati, e avevano frequenze bassissime, al di fuori della portata dei nostri timpani.

E comunque, ogni suono è ormai cessato da lungo tempo. Le campane della creazione tacciono da miliardi di anni, da quando il plasma primordiale si è trasformato in materia neutra. Il Cosmo di oggi è un enorme spazio vuoto e muto.

I cosmologi che investigano l'origine dell'Universo si trovano perciò nella stessa situazione di Beethoven: se vogliono ricostruire qualcosa delle onde che risuonavano nel plasma primordiale devono escogitare metodi indiretti. Se non possono ascoltare un suono, dovranno inseguire un'immagine. Osservando la radiazione cosmica di fondo, dovranno sperare di trovarvi una traccia delle increspature prodotte dalle onde acustiche.

In effetti, sappiamo che la distribuzione delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo "fotografa" lo stato del plasma primordiale al momento della ricombinazione. In un certo senso, possiamo considerarla un'istantanea che coglie le diverse perturbazioni in fasi diverse della loro oscillazione.

Pensate a quello che succede se gettate un sassolino in uno stagno: si crea una serie di onde circolari ben definite, con una precisa lunghezza d'onda. Possiamo supporre che la lunghezza d'onda dipenda approssimativamente dalla larghezza del sasso. Se ora gettiamo tanti sassi nello stagno, ognuno di dimensioni diverse, come risultato avremo increspature molto più complicate, frutto della sovrapposizione delle varie onde prodotte da ciascun sasso. Facendo una foto delle increspature, possiamo cercare di ricostruire il contributo delle singole onde e magari, da queste, le dimensioni e il numero dei sassolini? In linea di principio sì: possiamo effettuare un'analisi armonica dell'immagine e produrne lo spettro in frequenza, allo stesso modo di quanto si fa con un suono.

Possiamo applicare lo stesso tipo di idea alla radiazione cosmica di fondo. Supponiamo di aver misurato come varia la sua temperatura puntando un rivelatore in diverse direzioni del cielo. Da questi dati possiamo costruire un'immagine, ad esempio associando un diverso colore a ogni valore della temperatura. Se la radiazione è anisotropa, come ci aspettiamo, l'immagine non sarà uniforme, ma mostrerà macchie di colori diversi, in corrispondenza delle regioni più calde o più fredde della media. Le macchie avranno dimensioni diverse, e comporranno un mosaico di forme simile alla pelle di un leopardo. Possiamo pensare a queste macchie un po' come alle increspature sullo stagno dell'esempio precedente. Il disegno complessivo sarà il risultato della sovrapposizione di macchie di dimensione caratteristica differente. Tutte le macchie di una certa dimensione saranno state causate da perturbazioni della stessa estensione, che quindi avranno anche la stessa frequenza.

Quindi, se analizziamo l'immagine, "scomponendola" in modo da isolare il contributo di fluttuazioni di dimensione differente, e mettiamo in un grafico l'intensità media delle fluttuazioni in funzione della loro dimensione, avremo un'idea di quanto erano intense le onde acustiche di una certa frequenza nell'Universo

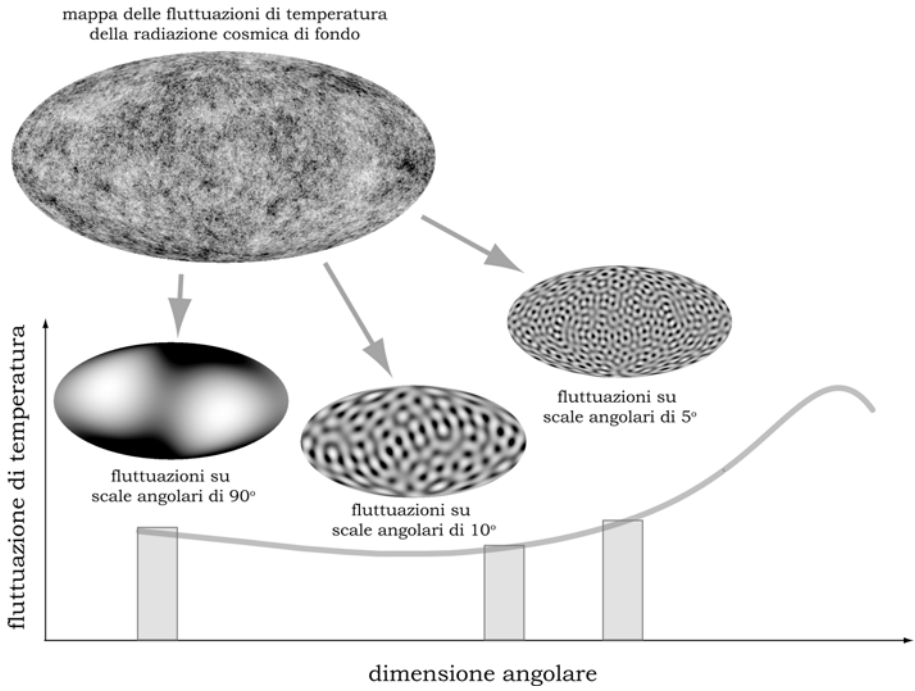



Figura 4.6: Per ricostruire lo spettro delle oscillazioni acustiche presenti nel plasma primordiale, i cosmologi analizzano un'immagine della radiazione cosmica di fondo, isolando i contributi provenienti da fluttuazioni di temperatura di diversa dimensione angolare (nella figura è mostrato il contributo delle fluttuazioni per tre scale angolari scelte a puro titolo esemplificativo). L'intensità media delle fluttuazioni (indipendentemente dal segno), in funzione della dimensione angolare, viene messa in un grafico: lo spettro ottenuto permette di ricostruire l'ampiezza che onde di diversa frequenza avevano al momento della ricombinazione.

primordiale: avremo cioè ricostruito lo spettro delle onde acustiche (figura 4.6). Va tenuto presente che, nel fare questa operazione, non ha importanza che una certa macchia rappresenti una zona calda o una zona fredda: quello che conta è l'intensità della fluttuazione, cioè quanto la temperatura di quella regione si discosta dalla media. Lo spettro ottenuto in questo modo sarà simile alla successione di barrette verticali nell'equalizzatore grafico di un impianto *hi-fi*. Maggiore l'altezza di una barretta, maggiore il contributo delle onde di quella frequenza al suono

complessivo. Come il profilo delle barrette dell'equalizzatore dipende dal tipo di musica che stiamo ascoltando, così la forma dello spettro delle oscillazioni acustiche primordiali, ricostruito dalle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo, ci dirà qualcosa sulla natura dell'Universo. Ma che tipo di spettro possiamo aspettarci di osservare? Avrà regolarità simili a quelle che si osservano nello spettro di un suono musicale, o assomiglierà piuttosto a quello di un rumore completamente incoerente?

Come abbiamo visto, quando uno strumento musicale emette un suono, oltre all'onda di frequenza fondamentale (che stabilisce il tono della nota) vengono generate altre onde a frequenze multiple della fondamentale, le cosiddette armoniche. Pitagora ci ha insegnato che, quando pizzichiamo una corda, la frequenza fondamentale è legata alla lunghezza della corda. Come abbiamo già detto, è il fatto che la corda sia fissata alle estremità a imporre vincoli molto precisi alla frequenza delle armoniche prodotte dalla sua vibrazione. Solo le onde che riescono ad accomodarsi nello spazio tra un'estremità e l'altra della corda possono vibrare, ed è questo vincolo fisico che impone alle frequenze armoniche di essere multipli interi della fondamentale. La gradevolezza del suono emesso da uno strumento, quindi, è strettamente legata alle sue caratteristiche costruttive, ai vincoli che esso impone alle onde che possono risuonare al suo interno.

Nel caso delle onde acustiche presenti nell'Universo primordiale, il vincolo fisico non è di natura spaziale, come in uno strumento musicale, ma di natura temporale. La vita delle onde sonore nel plasma è di durata limitata: va dal momento in cui le perturbazioni di densità iniziano a oscillare a causa della competizione fra gravità e pressione (torneremo su questo punto tra breve), fino al momento in cui la radiazione si disaccoppia dalla materia, all'epoca della ricombinazione. Il punto cruciale da tenere presente è che, quando ricostruiamo lo spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo, stiamo di fatto stabilendo in quale fase di oscillazione si trovano perturbazioni di dimensione diversa (ovvero onde di frequenza diversa).

Alcune perturbazioni verrano colte dalla ricombinazione mentre sono in una fase di massima compressione o di massima rarefazione: le onde acustiche corrispondenti saranno cioè in uno dei punti estremi dell'oscillazione, un massimo (un ven-

tre) o un minimo (una gola). Supponiamo di osservare un'onda che raggiunge per la prima volta un estremo dell'oscillazione (ad esempio un ventre) esattamente alla ricombinazione: questa perturbazione sarà caratterizzata dalla maggiore lunghezza d'onda possibile, ossia dalla minore frequenza. Possiamo definire questa frequenza come quella fondamentale (in analogia con la fondamentale di una canna d'organo aperta alle due estremità). Onde di frequenza doppia avranno invece compiuto un'oscillazione completa, e si presenteranno alla ricombinazione con una gola. Onde di frequenza tripla saranno passate prima per un ventre, poi per una gola, e si troveranno di nuovo con un ventre alla ricombinazione, e così via (figura 4.7).

In maniera analoga, esisteranno anche onde che alla ricombinazione sono esattamente in una situazione intermedia tra i due estremi dell'oscillazione: le perturbazioni corrispondenti avranno cioè in quel momento un valore di densità esattamente pari alla media. Questo comportamento si verificherà per onde che hanno frequenze pari a quella fondamentale moltiplicata per 3/2, 5/2, 7/2 e così via.

Le perturbazioni che si trovano in una fase di massima compressione o di massima rarefazione al momento della ricombinazione produrranno macchie più intense di tutte le altre sulla radiazione cosmica di fondo e daranno quindi un contributo massimo allo spettro di potenza. Le oscillazioni acustiche presenti nel plasma primordiale si traducono perciò, al momento della ricombinazione, in uno spettro che presenta una serie di picchi armonici, ovvero di massimi per valori di frequenze multiple di una frequenza fondamentale, proprio come nel caso del suono prodotto da una canna d'organo. Questi picchi saranno separati tra loro da altrettante valli, in corrispondenza delle frequenze delle perturbazioni che giungono al momento della ricombinazione nella fase intermedia tra la compressione e la rarefazione (densità pari alla media).

Una differenza tra le oscillazioni acustiche del plasma primordiale e le onde sonore generate da una corda vibrante o da una canna d'organo è che in questi ultimi due casi l'esistenza di onde di frequenza diversa da quella fondamentale, o dai suoi multipli, non è consentita: i vincoli fisici dello strumento, come abbiamo già detto, impongono restrizioni molto forti al tipo di

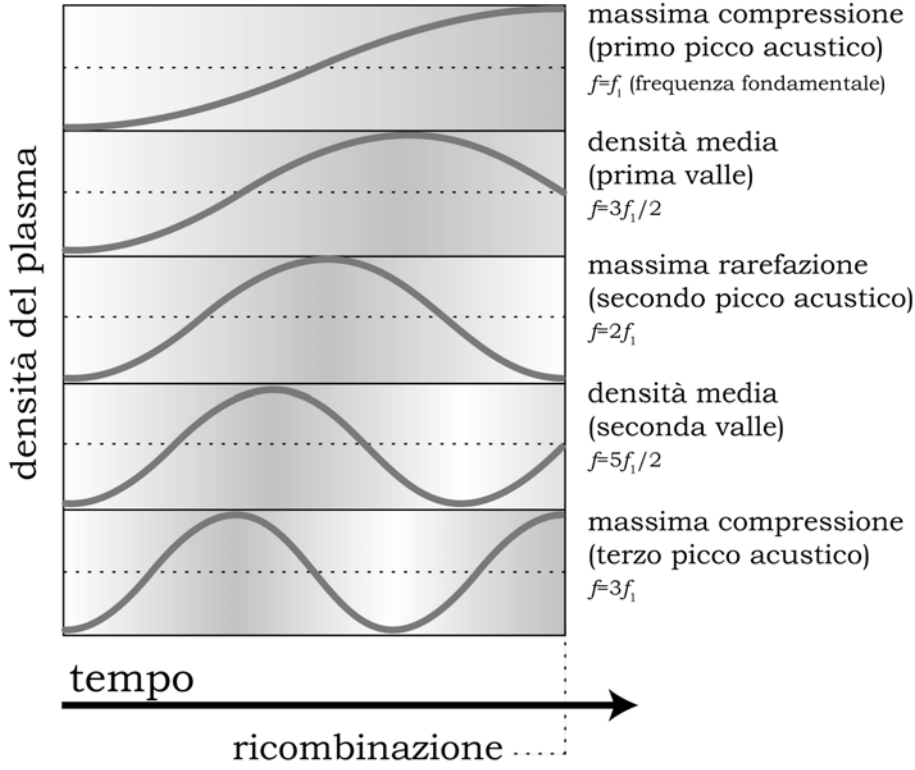



Figura 4.7: Onde acustiche di diversa frequenza arrivano alla ricombinazione in fasi diverse dell'oscillazione: l'onda che arriva per prima alla massima compressione è quella che corrisponde alla frequenza fondamentale. Questa produrrà un picco nello spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo. L'onda che giunge in una fase intermedia corrisponderà a una valle nello spettro. L'onda che si trova nella fase di massima rarefazione è quella corrispondente alla seconda armonica, e produce il secondo picco nello spettro, e così via.

suono che può essere prodotto. Nel caso delle perturbazioni del plasma, invece, le onde acustiche possono avere qualsiasi frequenza. Tuttavia, le onde corrispondenti alla frequenza fondamentale e alle sue armoniche avranno, al momento della ricombinazione, un'ampiezza molto maggiore di tutte le altre, essendo in una fase di massima compressione o di massima rarefazione, ed è proprio questo fatto a produrre picchi nello spettro a frequenze ben precise.

Tutto questo ragionamento poggia però su un punto fondamentale, che finora abbiamo dato per scontato: tutte le perturbazioni di una certa dimensione devono iniziare a oscillare in un momento ben definito, e nella stessa fase. Soltanto se questo è vero, le onde della stessa frequenza arriveranno alla ricombinazione esattamente nello stesso punto del ciclo di oscillazione. Ma chi ci garantisce che ciò sia davvero accaduto? Esiste un meccanismo che possa sincronizzare le onde acustiche della stessa frequenza?

Il ruolo di direttore d'orchestra per le onde sonore nell'Universo primordiale è giocato dall'inflazione. Come abbiamo visto, questo meccanismo produce perturbazioni di tutte le dimensioni, che entrano nell'orizzonte mano a mano che esso include regioni di Universo sempre più grandi: le perturbazioni di scala minore entrano per prime nell'orizzonte, seguite da quelle su scala più grande, e così via. Immediatamente dopo l'ingresso nell'orizzonte, le perturbazioni avvertono l'effetto della gravità e la risposta della pressione di radiazione e quindi iniziano a oscillare. Il momento in cui prendono il via le oscillazioni acustiche è quindi indentico per tutte le perturbazioni della stessa dimensione. Questo fa anche sì che tutte le perturbazioni di una certa dimensione inizino l'oscillazione in maniera sincronizzata: in altre parole, tutte le onde di una certa frequenza oscillano in fase. Di conseguenza, tutte le perturbazioni della stessa dimensione si troveranno esattamente nello stesso stato al momento della ricombinazione.

Quindi, se è stata davvero l'inflazione a produrre le perturbazioni primordiali, dovremmo poter osservare delle regolarità nello spettro, dei picchi in corrispondenza della frequenza fondamentale e delle successive armoniche. Se invece così non fosse, se le perturbazioni di una certa dimensione fossero state generate continuamente durante l'evoluzione cosmica e avessero iniziato a oscillare con fasi completamente diverse, ogni caratteristica armonica andrebbe distrutta, e lo spettro ci apparirebbe più simile a quello di un rumore confuso.

La ricca struttura armonica dello spettro è quindi una fonte di preziose informazioni per i cosmologi. L'osservazione di picchi nello spettro alle frequenze previste dalla teoria, sarebbe un'enorme evidenza a favore dei modelli inflazionari. Se voglia-

mo avere un'idea di quali altri tesori si celino nella musica del Cosmo, dobbiamo però prima capire qualcosa di più sulla fisica delle oscillazioni acustiche nel plasma primordiale.

## Per picchi e per valli

L'esistenza di picchi a intervalli regolari nello spettro ottenuto dall'analisi delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo, fu prevista dai cosmologi pochi anni dopo la scoperta di Penzias e Wilson. La fisica necessaria a comprendere le oscillazioni acustiche nel plasma primordiale venne sviluppata a Princeton, nei primi anni settanta, da James Peebles e da un suo studente, Jar Yu; contemporaneamente, Yakov Zel'dovich e Rashid Sunyaev a Mosca giungevano a risultati analoghi. La possibile esistenza di oscillazioni acustiche nell'Universo era in realtà già stata notata nel 1965 dal fisico e dissidente sovietico Andrei Sakharov, sebbene in un contesto diverso da quello del plasma primordiale. I picchi nello spettro furono per lungo tempo chiamati *picchi Doppler* dai cosmologi, in maniera del tutto inappropriata, in quanto essi non hanno nulla a che fare con l'effetto Doppler. Oggi, vengono chiamati comunemente, e correttamente, *picchi acustici*.

Man mano che gli studi teorici sulle oscillazioni acustiche proseguivano e diventavano più sofisticati, i cosmologi si resero conto che c'era dell'oro nascosto tra quei picchi e quelle valli: la possibilità di determinare con grande precisione il valore dei parametri cosmologici, la manciata di numeri che definisce il tipo di Universo in cui viviamo. Per la prima volta, da quando la cosmologia aveva cominciato il suo percorso per diventare una scienza, l'alone di indeterminatezza che ne aveva avvolto i risultati prometteva di potersi dissipare.

Esattamente come possiamo distinguere uno strumento musicale da un altro attraverso un'analisi armonica del suono che produce, lo spettro delle fluttuazioni della radiazione di fondo permette di capire in che tipo di Universo viviamo. Il modo in cui i picchi si alternano nello spettro, e la loro ampiezza relativa, dipende infatti molto fortemente dalle condizioni fisiche esistenti nel plasma primordiale. Variando i parametri cosmologici, si

ottengono spettri molto diversi: ogni Universo suona con un suo "timbro" caratteristico. Cerchiamo allora di capire meglio quali informazioni è possibile ottenere da questo tipo di analisi.

Innanzitutto, possiamo chiederci quante armoniche dovremmo aspettarci di osservare nello spettro delle fluttuazioni della radiazione di fondo. Esiste una frequenza massima al di sopra della quale le oscillazioni acustiche non possono sostenersi nel plasma primordiale? È una domanda interessante. Nell'aria, per esempio, non tutti i suoni riescono a propagarsi: le onde con frequenze molto alte vengono rapidamente dissipate, perché non riescono a produrre un'oscillazione in grado di viaggiare per lunghi tratti. L'aria infatti non è un mezzo continuo, ma ha una "granulosità", essendo composta di molecole. Non si possono quindi produrre nell'aria increspature di dimensioni più piccole della minuscola distanza fra le molecole. Allo stesso modo, nel plasma primordiale non tutte le onde acustiche riescono a sopravvivere fino alla ricombinazione: quelle di frequenza molto alta (corrispondenti perciò a perturbazioni su scale molto piccole) vengono cancellate dai processi di diffusione. A causa di questo fatto, scoperto nel 1968 da Joseph Silk, ci si aspetta che solo le prime tre frequenze armoniche producano picchi ben visibili nello spettro acustico. I picchi a partire dal quarto sono considerevolmente attenuati, e non contribuiscono molto al timbro complessivo. L'osservazione di questo effetto di cancellazione dei picchi acustici è di per sé molto importante per comprendere nel dettaglio i processi fisici che sono avvenuti nel plasma primordiale. Ma è nei primi tre picchi acustici che è contenuta abbastanza informazione da poter gettare luce su diverse questioni cruciali della cosmologia.

Una delle più importanti riguarda la quantità di materia presente nell'Universo. Questa influenza in maniera molto forte l'altezza dei picchi acustici dello spettro. Per capire perché, dobbiamo ricordare che l'altezza dei picchi è determinata dall'ampiezza che hanno al momento della ricombinazione le onde acustiche corrispondenti a perturbazioni di scala diversa. Dobbiamo inoltre tenere presente il diverso ruolo giocato dalla materia di tipo barionico e dalla materia oscura nella fisica delle oscillazioni acustiche. La materia oscura facilita il collasso gravitazionale delle perturbazioni; tuttavia, al contrario della materia bario-

nica, essa non partecipa alle oscillazioni acustiche, in quanto non risente dell'interazione con i fotoni (ritorneremo ancora su questo punto tra breve).

Possiamo visualizzare meglio quello che accade a una perturbazione del plasma primordiale con un'analogia (figura 4.8). Immaginiamo di appendere al soffitto un capo di una molla, e di sospendere un peso all'altro capo. Ora, tirando leggermente il peso verso il basso, mettiamo in oscillazione la molla. In questo modellino fisico, i barioni sono rappresentati dalla massa sospesa alla molla. La forza di gravità tende ad attrarre la massa, facendo scendere il peso verso il pavimento. La molla, invece, fornisce una forza di richiamo verso l'alto, che si oppone alla forza di gravità. La molla, perciò, svolge il ruolo che nel plasma primordiale è ricoperto dalla pressione dei fotoni. Il campo gravitazionale terrestre svolge, invece, un effetto simile a quello che ha la materia oscura: attrae la massa dei barioni, ma non partecipa alle oscillazioni.

Con questo semplice modellino in mente, possiamo cercare di capire meglio la fisica delle oscillazioni acustiche. Aumentare la quantità di barioni presenti nell'Universo, a parità di altre condizioni, equivale ad aumentare la massa sospesa alla molla. Questa, oscillando, si avvicinerà maggiormente al pavimento, e farà più fatica a risalire verso l'alto. Si viene quindi a creare un'asimmetria tra gli estremi dell'oscillazione. Le oscillazioni che si vengono a trovare alla ricombinazione in una fase in cui il moto del fluido è agevolato dalla spinta gravitazionale avranno un'ampiezza maggiore di quelle che invece sono nella fase opposta, in cui la gravità ostacola il moto. Questo porta a una netta distinzione tra l'ampiezza del primo picco nello spettro acustico e quella del secondo picco (o, più in generale, tra picchi dispari e picchi pari). Si trova infatti che l'onda di frequenza fondamentale (cui è associato il primo picco) viene colta dalla ricombinazione proprio nella fase in cui la gravità assiste il moto (massima compressione). Al contrario, l'onda a frequenza doppia (corrispondente alla prima armonica e quindi al secondo picco e alla massima rarefazione) viene nello stesso momento a trovarsi in uno stato in cui la gravità si oppone al moto.

Quindi, riassumendo le conclusioni del ragionamento, il primo picco nello spettro avrà in generale un'altezza maggiore del

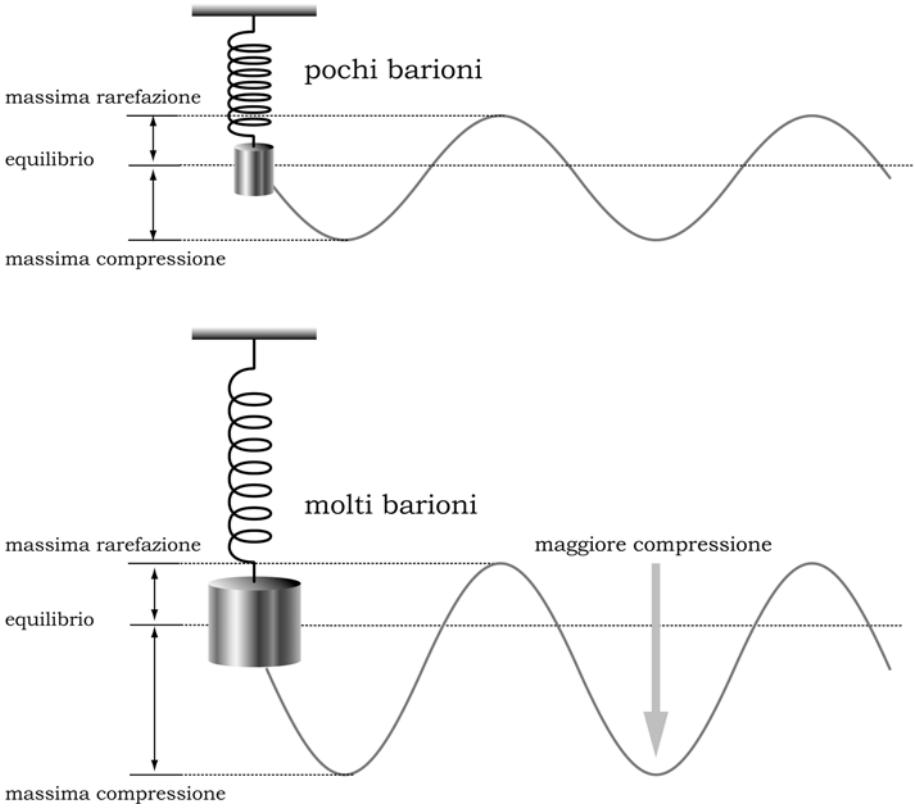



Figura 4.8: La quantità di barioni presenti nel plasma influenza l'ampiezza delle oscillazioni acustiche, proprio come quando si aumenta la massa sospesa a una molla. Se sono presenti più barioni, la fase di compressione (sospinta dalla gravità) sarà agevolata rispetto a quella di rarefazione. Questo aumenta il divario tra l'ampiezza dei picchi pari e dispari nello spettro.

secondo: inoltre, il divario tra le due altezze sarà tanto più grande quanto maggiore è il contenuto di barioni nel plasma primordiale (figura 4.9). Pertanto, confrontare l'altezza del primo picco con quella del secondo è un metodo potentissimo per "pesare" la materia barionica, cioè il numero totale di atomi presenti nell'Universo. Questo metodo è inoltre completamente indipendente da quello basato sulla nucleosintesi primordiale (che abbiamo incontrato nel capitolo 2).

Ma non è finita qui. Infatti, anche la presenza di materia

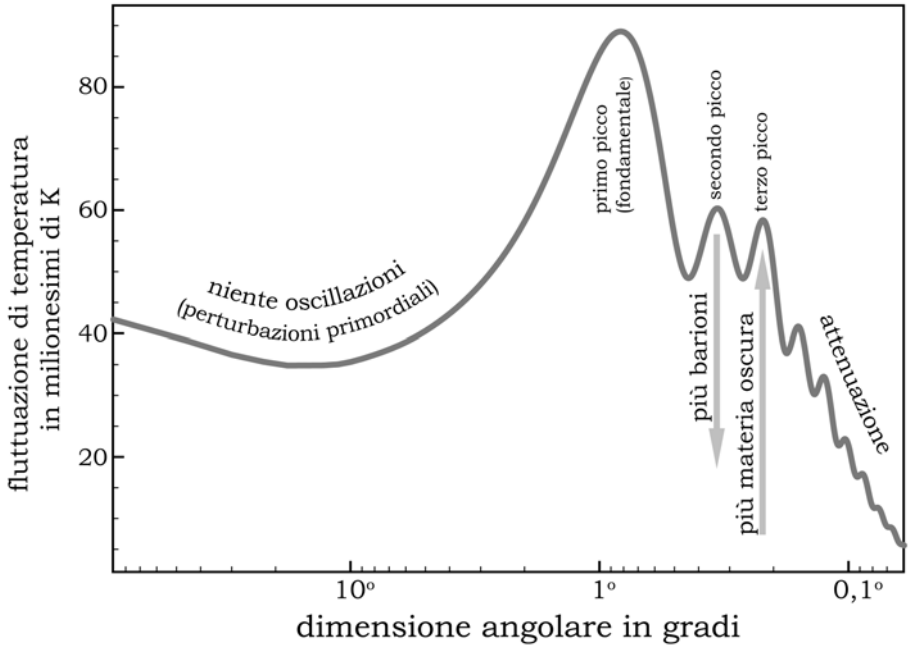



Figura 4.9: I calcoli teorici prevedono uno spettro delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo in cui sono evidenti picchi a frequenze armoniche di una frequenza fondamentale. La forma dei picchi dipende dal valore preciso dei parametri cosmologici (come la quantità di barioni o di materia oscura).

oscura influenza l'altezza dei picchi acustici, nonostante essa non partecipi direttamente alle oscillazioni. In particolare, l'altezza del terzo picco acustico relativamente ai primi due è tanto maggiore quanta più materia non barionica è presente nell'Universo. Il meccanismo che modula l'ampiezza relativa dei picchi a seconda del diverso rapporto tra materia barionica e non barionica è complicato, e deve far abbandonare il semplice modellino della molla sospesa al soffitto. In particolare, non è possibile semplicemente ipotizzare che le oscillazioni avvengano in un contesto in cui la spinta gravitazionale che tende ad accrescere le perturbazioni resta costante nel tempo.

Questo è dovuto essenzialmente a due motivi. Innanzitutto, bisogna tenere conto che l'Universo si espande, e che di con-

seguenza la sua densità media cambia con il tempo. Inoltre, la presenza della radiazione è sempre più importante man mano che ci si spinge a tempi remoti dell'evoluzione cosmica: dal punto di vista della relatività generale, quindi, non possiamo trascurare i suoi effetti gravitazionali sul plasma. Ma se la spinta gravitazionale avvertita dalle perturbazioni varia con il tempo, le perturbazioni che cominciano a oscillare per prime (ovvero quelle su scale più piccole, che entrano prima nell'orizzonte) sperimenteranno una situazione diversa da quelle che cominciano a oscillare più tardi. È proprio da questo effetto che nasce la modulazione nell'altezza dei picchi, dal momento che armoniche successive sono associate a onde che hanno iniziato a oscillare in tempi diversi (cioè a perturbazioni di scale diverse). Tutto questo dipende in modo cruciale dalla quantità di materia oscura, o meglio dal rapporto tra la densità di materia oscura e di fotoni: è proprio questo rapporto, infatti, che stabilisce il momento dell'evoluzione cosmica in cui la radiazione diventa ininfluente dal punto di vista gravitazionale.

In tutto quello che abbiamo detto finora, va comunque tenuto presente che non tutte le perturbazioni danno luogo a oscillazioni nel plasma primordiale. Le perturbazioni di dimensioni molto grandi, che entrano nell'orizzonte dopo la ricombinazione, non oscillano mai, in quanto non sperimentano mai l'opposizione della radiazione all'attrazione gravitazionale. A queste perturbazioni sono associate frequenze molto basse: lo spettro dei toni più gravi sarà quindi privo di picchi caratteristici. Questa zona "piatta" dello spettro è però altrettanto importante della regione dei picchi acustici. Essa infatti ci dà un'idea di quale fosse lo stato iniziale delle perturbazioni, prima che esso venisse alterato dai fenomeni che hanno avuto luogo nel plasma primordiale. È quindi un mezzo di indagine delle fasi più remote dell'evoluzione cosmica, in particolare dei meccanismi che hanno generato le perturbazioni di densità primordiali, come l'inflazione.

Sono passati 2500 anni da quando Pitagora fu colpito dalla profonda connessione che i fenomeni del mondo fisico hanno con le verità astratte della matematica. Gli esperimenti di Pitagora con il monocordo furono il primo uso del metodo sperimentale; e le relazioni tra numeri interi e suoni musicali il primo esempio di legge di natura descritta in termini matematici. Tut-

to il lungo e faticoso cammino della scienza moderna ha avuto inizio da lì. Sorpreso dalla potenza del metodo in cui si era imbattuto, Pitagora se ne fece coinvolgere a tal punto da inventare una cosmologia, un sistema di relazioni matematiche e musicali tra i fenomeni del cielo e della Terra. La fascinazione continuò per secoli, arrivò fino a Keplero, e ancora nel XVII secolo l'inglese Robert Fludd, una bizzarra figura di alchimista come se ne trovavano a quei tempi, raffigurava l'Universo come un "monocordo cosmico". A un capo del monocordo, a girare la chiavetta per accordare i toni dell'Universo e le leggi che lo governano, c'era Dio: all'altro capo, l'uomo, e il pianeta Terra.

Molti secoli dopo, all'alba del secondo millennio, nelle indagini sulle origini del Cosmo sono riapparse metafore e metodi di analisi legati ai fenomeni sonori. I cosmologi si sono resi conto che, misurando lo spettro acustico del plasma primordiale e confrontandolo con la struttura dei picchi previsti dai loro calcoli, non solo potevano avere una straordinaria conferma delle loro teorie, ma potevano anche conoscere con grandissima precisione il valore di quantità rimaste pressoché indeterminate per decenni: il "peso" di tutto l'Universo, la quantità di materia ordinaria e di materia oscura che lo costituisce, la sua età, la velocità esatta alla quale si espande. Variando i parametri del modello cosmologico che avevano faticosamente costruito, come se girassero le chiavette di un violino, hanno sognato di poter accordare le loro teorie in modo che suonassero la stessa musica dell'Universo. Seduti di fronte ai loro calcolatori, hanno simulato un numero enorme di spettri, modulando il timbro delle onde acustiche primordiali in milioni di modi diversi. Le loro equazioni davano risultati talmente precisi che avrebbero potuto distinguere delicatissime sfumature di tono, e da queste cogliere minuscole differenze nei valori numerici che definiscono il modello cosmologico. Ecco la promessa della cosmologia di precisione, ecco a portata di mano la risposta ai tanti interrogativi sulla natura dell'Universo che l'umanità si è posta per millenni.

Ma proprio come la musica delle sfere di Pitagora e Keplero, che risuonava solo nella fantasia di coloro che l'avevano immaginata, fino a pochi anni fa nessuno era ancora riuscito a catturare la minima evidenza di onde acustiche nell'Universo primordiale. La caccia a questi suoni misteriosi è stata una delle sfide

più formidabili che la scienza moderna abbia dovuto affrontare. Il modo in cui i cosmologi hanno inseguito questa meta ambiziosa, affrontando i deserti texani o le fredde distese antartiche, lanciando palloni o mandando in orbita satelliti, è una storia avvincente che vale la pena di raccontare.

# ·5·

# ARMONIA SVELATA

*La novità del suono e 'l grande lume*
*di lor cagion m'accesero un disio*
*mai non sentito di cotanto acume.*

Dante Alighieri, *Paradiso, I*

In ogni storia di avventure che si rispetti, c'è un tesoro sepolto in qualche posto remoto, che aspetta di essere scoperto. C'è un premio in palio per il più coraggioso, il più astuto, per colui che ha le informazioni più accurate o i mezzi più adatti per affrontare la ricerca. In genere c'è anche di mezzo una mappa, spesso scritta in una lingua sconosciuta, o incompleta, o piena di enigmi da risolvere. Chi riesce a mettere per primo le mani sulla mappa acquista un vantaggio spesso incolmabile rispetto ai suoi concorrenti.

Come abbiamo visto, lo spettro acustico del plasma primordiale è una vera e propria miniera d'oro. Tra i suoi picchi e le sue valli sono sepolte ogni sorta di preziose informazioni sulla natura del Cosmo. Ma sappiamo che per ricostruire l'esatta posizione e altezza di ciascun picco bisogna effettuare l'analisi armonica di un'immagine della radiazione cosmica di fondo. Come tutti i cercatori di tesori, i cosmologi hanno quindi dovuto procurarsi una cartina del territorio da esplorare, che nel loro caso doveva consistere in una fedele rappresentazione delle tenui variazioni di temperatura del fondo cosmico. Solo avendo in mano una

mappa accurata, in cui fossero segnati anche i minimi dettagli, c'era qualche speranza di portare alla luce le preziose pepite.

Il cammino che ha portato i cosmologi a ottenere un'immagine dettagliata della radiazione cosmica di fondo è stato in effetti lungo e lastricato di difficoltà. Un'impresa avventurosa durata decenni, che soltanto negli ultimi anni ha finalmente cominciato a dare i suoi frutti.

## In cerca dell'Eldorado

La migliore mappa della radiazione cosmica di fondo che i cosmologi avevano a disposizione alla fine degli anni novanta del XX secolo era quella prodotta da COBE quasi dieci anni prima. Una mappa che aveva avuto un'importanza straordinaria per la cosmologia, ma che era diventata ormai inadeguata per le grandi ambizioni dei cercatori d'oro.

Il problema di COBE era che la sua vista, pur essendo molto sensibile, era allo stesso tempo molto miope. In altre parole, COBE poteva percepire lievissime sfumature di temperatura nella radiazione di fondo, ma non era in grado di mettere a fuoco "macchie" più piccole di una certa dimensione. Era come se COBE avesse prodotto una mappa talmente accurata dei rilievi montuosi di una regione da poter distinguere differenze di altezza di pochi millimetri, ma non fosse capace di accorgersi della presenza di strutture poco estese in larghezza, come gole strette o guglie. Questo voleva dire che da un'analisi armonica della mappa di COBE non era possibile ottenere informazioni su increspature troppo piccole, e quindi sulle frequenze più alte dello spettro. Purtroppo, le frequenze precluse a COBE erano proprio quelle dove ci si aspettava di trovare la ricca struttura dei picchi acustici.

Dalle mappe di COBE si poteva quindi ricostruire la regione "piatta" dello spettro, quella generata dalle perturbazioni che non hanno mai iniziato a oscillare, perché sono entrate nell'orizzonte dopo che la materia e la radiazione si erano già disaccoppiate. Come abbiamo detto, questa zona dello spettro porta ben impresse le tracce delle perturbazioni primordiali, e ha quindi fornito un importante indizio in favore della correttezza dello

scenario dell'inflazione. D'altro canto, COBE non era in grado di fare alcuna indagine sulla fisica delle oscillazioni acustiche, quindi non poteva fornire alcuna informazione su quello che è accaduto nel plasma primordiale. La sua capacità di discriminare diversi modelli di Universo dal loro "timbro" caratteristico era estremamente ridotta. La miopia di COBE, ironicamente, si traduceva in un pessimo orecchio musicale.

Ma a dispetto di tutte le sue limitazioni, COBE aveva fatto quello che hanno sempre fatto tutti i pionieri. Aveva aperto una pista, aveva dato fiducia a una intera comunità di scienziati che si poteva continuare su quella strada. Le anisotropie cercate per decenni esistevano davvero, il quadro concettuale era giusto. Ora che c'era una mappa grossolana del territorio, era venuto il momento di mettersi a lavorare seriamente sui dettagli. Il clima quasi euforico generato dal successo di COBE produsse una drammatica accelerazione nella ricerca sulla radiazione di fondo, portando a progressi notevoli dal punto di vista teorico, e allo stesso tempo motivando i gruppi di ricercatori a produrre osservazioni sempre più sofisticate. Gli anni novanta furono una vera e propria età dell'oro, un periodo di attività febbrile senza precedenti nella storia della cosmologia.

Essendo difficile ottenere i fondi per un'altra missione spaziale immediatamente dopo COBE, tutti gli sforzi si concentrarono sulla realizzazione di esperimenti economicamente meno onerosi, ma non per questo con minori ambizioni scientifiche, o meno complicati da realizzare. Lo scopo era chiaro: assicurarsi le immagini del fondo cosmico più nitide e con i maggiori dettagli, con la speranza di essere i primi a notare la presenza di quei picchi armonici che nel frattempo i colleghi teorici collegavano con sempre maggiore precisione ai valori dei parametri cosmologici.

La forsennata ricerca dei picchi acustici nello spettro coinvolse decine di gruppi sparsi in tutto il mondo, ognuno con il suo apparato fatto più o meno in casa. Molti di questi congegni vennero montati su palloni stratosferici, altri vennero tenuti a terra, in luoghi spesso ostili o remoti ma tali da fornire condizioni osservative ottimali. Proprio come i cercatori d'oro, ogni gruppo lavorava in competizione con tutti gli altri, setacciando i dati in modo frenetico per riuscire a estrarre almeno qualche pagliuzza

d'oro. Ma il filone intero era ancora completamente inesplorato e nessuno poteva dire dove fosse, né se esistesse davvero.

Diciamo la verità: come in tutte le corse all'oro, la situazione era estremamente confusa. Gli esperimenti in volo su pallone, avendo a disposizione un tempo di osservazione limitato, potevano tentare di mettere a fuoco le loro osservazioni solo in una zona di cielo molto piccola. Questi esperimenti dovettero fare di necessità virtù, e accontentarsi di osservazioni "mordi e fuggi" con cui sperare di cogliere almeno uno scorcio utile, un frammento accurato dell'immagine complessiva. Gli apparati a terra, pur avendo più tempo a disposizione, erano condizionati dalla presenza dell'atmosfera che, come sappiamo, è una fonte di disturbo piuttosto importante.

In queste condizioni svantaggiose, ogni esperimento poteva al massimo riuscire a cogliere il segnale contenuto in una regione dello spettro estremamente limitata. Mettere insieme le diverse osservazioni per avere un'idea della struttura complessiva dei picchi era un'impresa a dir poco ardua. È come se a diverse persone venisse chiesto di ascoltare la stessa sinfonia trasmessa alla radio, ma a ciascuno venisse dato un apparecchio in grado di riprodurre correttamente solo un piccolo intervallo di frequenze, diverso da tutti gli altri. Alcuni sentirebbero meglio i suoni più acuti, come le note emesse dai flauti o dai violini, altri solo i suoni intermedi, altri ancora sentirebbero solo il contrabbasso o i timpani. Se poi ogni radio avesse anche un rumore diverso, il segnale fosse cattivo, e la trasmissione molto debole, anche mettendo insieme il suono di tutte le radio non verrebbe fuori un granché.

Questa era più o meno la situazione verso la fine degli anni novanta. L'informazione complessiva sullo spettro acustico andava ricostruita dalla combinazione dei risultati di decine di esperimenti diversi, talvolta incompatibili tra loro, e ognuno con le sue incertezze e le sue diverse caratteristiche. Attraverso analisi statistiche dei dati congiunti, alcuni ricercatori sostenevano che fosse possibile intravvedere la presenza del primo picco acustico nello spettro. Sebbene questa conclusione non fosse universalmente condivisa, era chiaro che le cose stavano cambiando rapidamente. Le nebbie si stavano diradando, e in breve tempo sarebbe stato chiaro se all'orizzonte c'erano davvero pic-

chi e valli da esplorare, o un desolato deserto. I cosmologi non potevano ancora saperlo con certezza, ma erano ormai a pochi passi dall'Eldorado.

## L'Universo visto dal pallone

Alle soglie del nuovo millennio, l'enorme progresso tecnologico compiuto nella costruzione di rivelatori sensibili alle microonde metteva per la prima volta i ricercatori nella condizione di produrre immagini ad alta risoluzione della radiazione cosmica di fondo. Era ormai a portata di mano la possibilità, anche per strumenti non in orbita nello spazio, di ottenere una misura dello spettro delle variazioni di temperatura su un intervallo di scale angolari abbastanza ampio da poter accertare la presenza del primo picco acustico.

Pur senza ricorrere a una costosa missione spaziale, questi nuovi apparati dovevano comunque essere portati in volo il più in alto possibile, per minimizzare il disturbo dovuto all'atmosfera e operare in condizioni osservative ottimali. La soluzione scelta fu quella di utilizzare il mezzo più vicino possibile a un dispositivo orbitale: un pallone in volo nella stratosfera, una delle regioni più esterne dell'atmosfera terrestre.

Se vi è venuta in mente l'immagine di un baffuto personaggio di fine ottocento, che con il suo cannocchiale scruta il cielo a bordo di una cesta appesa a una variopinta mongolfiera, non vi siete sbagliati di molto. Dovete solo aggiornare un po' il quadro, e sostituire la cesta con una struttura in alluminio di un paio di tonnellate; il cannocchiale con un sofisticato sistema di specchi in fibra di carbonio, il più grande di circa un metro di diametro; l'occhio dell'osservatore con un sistema di rivelatori collegati a una serie di complessi apparati elettronici; e la colorata mongolfiera di solida tela con un pallone delle dimensioni di uno stadio di calcio fatto di materiale sintetico dello spessore di qualche milionesimo di metro.

Un dispositivo del genere viene fatto volare fino a un'altezza di circa 42 km sopra il livello del mare. Una quota ragguardevole, alla quale l'apparato si trova quasi nelle stesse condizioni osservative che se fosse nello spazio. Una grande differenza sta

nel fatto che, purtroppo, non si può tenere un pallone in volo a quell'altezza per un tempo indefinito. Le correnti atmosferiche fanno andare il pallone lentamente alla deriva, portandolo lontano dal punto in cui è stato lanciato. Al termine delle osservazioni l'apparato deve essere sganciato attraverso un comando a distanza, e fatto atterrare più o meno dolcemente, dopo una discesa controllata da un paracadute. La lunghezza del volo dipende da molti fattori, non ultima l'esigenza di non sganciare l'apparato su una zona popolata!

Il lancio di un pallone stratosferico, sebbene richieda certamente un'attività su scala più piccola di quella legata a una missione spaziale, è comunque un'impresa niente affatto semplice, e non esente da aspetti avventurosi. Nel 1982 un pallone lanciato in Brasile da un gruppo guidato da George Smoot perse il contatto con la base a terra e fu smarrito nel folto della giungla amazzonica. Fu ritrovato dopo oltre un anno, in circostanze rocambolesche: un cacciatore di frodo, dopo qualche bicchiere di troppo, si era vantato con gli avventori di una bettola di avere ritrovato una navicella aliena nella giungla. La cosa incuriosì i poliziotti locali, che costrinsero l'uomo (che nel frattempo, tornato sobrio, cercava di mettere a tacere la cosa) ad accompagnarli sul posto. Quando i ricercatori riuscirono finalmente a rimettere le mani sulla loro preziosa apparecchiatura scientifica, si accorsero che essa era diventata fonte di oggetti da collezionismo per la gente del posto.

Nel 1998, due esperimenti da pallone primeggiavano a livello internazionale in quanto a capacità tecnologiche: BOOMERANG, realizzato da ricercatori capeggiati da Andrew Lange, del California Institute of Technology, e da Paolo de Bernardis, dell'Università di Roma "La Sapienza"; e MAXIMA, guidato da Paul Richards dell'Università della California a Berkeley. Entrambi gli esperimenti avevano una lunga lista di collaboratori sparsi in diversi istituti in tutto il mondo.

Sebbene per molti versi simili dal punto di vista tecnologico, BOOMERANG e MAXIMA avevano due approcci piuttosto diversi al problema di osservare la radiazione di fondo ad alta risoluzione. MAXIMA era progettato per effettuare voli notturni di poche ore, da una sperduta località nel deserto del Texas, chiamata Palestine, dove la NASA ha una base per il lancio di palloni stra-

tosferici. Avendo a disposizione un tempo di osservazione relativamente breve, MAXIMA doveva necessariamente concentrare la sua osservazione su una regione piuttosto limitata del cielo, in modo da raccogliere il maggior numero possibile dei preziosi fotoni primordiali.

La strategia di BOOMERANG era più ambiziosa. BOOMERANG avrebbe preso il volo dalle distese desolate di ghiaccio in Antartide. La particolare circolazione delle correnti atmosferiche in quella regione avrebbe permesso a BOOMERANG di rimanere in volo per un periodo molto lungo: una decina di giorni, durante i quali avrebbe fatto un giro completo del continente antartico e sarebbe tornato al punto di partenza per essere recuperato. Un boomerang, appunto. In questo modo, BOOMERANG sarebbe stato in grado di osservare una fetta di circa il 3% del cielo: una regione relativamente grande, sebbene ancora molto lontana da quella accessibile a un satellite spaziale.

Molte cose possono andare storte in un'impresa come quella che BOOMERANG e MAXIMA volevano tentare. Mantenere l'apparato in volo è di per sé un compito delicato: il materiale sottilissimo del pallone può bucarsi con estrema facilità, e un danno del genere può essere notato solo quando il congegno è stato lanciato ed è ormai troppo tardi per riparare. I sofisticati strumenti possono risentire di piccole oscillazioni dei cavi che li sostengono e il dispositivo può perdere stabilità: un'inclinazione anche lieve dell'apparato può portare a fastidiosi errori di misura, estremamente difficili da correggere. Gli specchi levigatissimi possono essere danneggiati anche da minuscoli granelli di polvere. I complicati sistemi di refrigerazione che mantengono i rivelatori a temperature prossime allo zero assoluto possono guastarsi e rendere impossibili le misurazioni. I computer che immagazzinano i dati possono smettere di funzionare, la trasmissione dei dati a terra può interrompersi: insomma la lista è talmente lunga che è quasi un miracolo che tutto vada per il verso giusto.

Ma nel 1998, per ben due volte, la fortuna aiutò gli audaci. Il *team* di MAXIMA fu costretto a ritardare il volo per diversi mesi a causa dell'insolita ondata di maltempo che flagellò gli Stati Uniti durante l'estate, ma ad agosto lo strumento riuscì finalmente ad alzarsi in volo dalla base di Palestine, e poté osservare il cielo

per quasi quattro ore di fila: un po' meno di quanto inizialmente sperato, ma comunque un ottimo risultato. BOOMERANG fu lanciato con successo alla fine dello stesso anno dalla base di McMurdo in Antartide, e riuscì a compiere l'intero tragitto previsto, per un totale di ben dieci giorni di osservazione.

Completate le misurazioni con successo, i due gruppi lavorarono duramente per oltre un anno, allo scopo di estrarre dai dati raccolti le informazioni che cercavano. Ottenere un'immagine accurata della radiazione cosmica di fondo, infatti, non è come scattare una foto, e assomiglia ben poco alle tradizionali osservazioni astronomiche. I dati vanno letteralmente setacciati, ripuliti, ordinati, sottoposti a sofisticati algoritmi numerici. È un processo che richiede pazienza, tecnica, lunghi tempi di calcolo su enormi supercalcolatori. Un percorso lungo ed estenuante, durante il quale bisogna guadagnarsi con fatica ogni singolo *pixel* dell'immagine che si sta cercando di far venire alla luce. Ogni piccola struttura nella mappa che si tenta di ricostruire deve essere separata dal rumore, deve essere incoraggiata a uscire dalla confusione delle tanti sorgenti di disturbo che tentano di oscurarla. Bisogna essere certi che ogni tenue macchiolina osservata, ogni minuscola variazione di intensità, sia stata davvero generata poche centinaia di migliaia di anni dopo il Big Bang. Se così non è, se è solo un abbaglio, bisogna eliminarla senza pietà.

Finalmente, nel 1999, quasi un anno dopo aver effettuato le osservazioni, gli sforzi dei ricercatori che avevano lavorato a BOOMERANG e MAXIMA furono ripagati. Sugli schermi dei loro computer apparvero per la prima volta le immagini della struttura ad alta risoluzione della radiazione cosmica di fondo. Nessuno aveva mai osservato una fotografia così nitida dell'Universo in una fase così antica della sua evoluzione, poche centinaia di migliaia di anni dopo il Big Bang. La composizione delle piccole macchie presenti nelle immagini assomigliava in maniera formidabile a quello che i cosmologi avevano per anni previsto nelle loro simulazioni. Era l'indizio che la teoria aveva seguito la strada giusta. I due gruppi non comunicavano tra loro per non influenzarsi reciprocamente, e anche perché erano impegnati in una leale competizione per giungere per primi ai risultati. Ma se avessero confrontato le mappe ottenute si sarebbero accorti

che, pur avendo osservato diverse zone del cielo con strategie completamente diverse, quello che stavano vedendo era molto simile. L'Universo primordiale era disseminato di increspature, e l'effetto sulla radiazione di fondo sembrava proprio quello provocato dal "congelamento" delle oscillazioni acustiche alla ricombinazione.

Ma il bello doveva ancora arrivare. Bisognava ancora effettuare l'analisi armonica dell'immagine per ottenere lo spettro delle variazioni di intensità. Anche questo è un processo lungo e complicato, ma quando nei primi mesi del 2000 l'analisi fu portata a termine e tutti i controlli sulla correttezza dei risultati furono ultimati, l'esito non lasciò dubbi. BOOMERANG e MAXIMA avevano chiaramente rivelato la presenza di un picco nello spettro. C'erano state, come abbiamo detto, avvisaglie della presenza di questo picco ottenute combinando i dati di diversi esperimenti. L'esperimento TOCO, condotto dall'altopiano cileno di Cerro Toco, aveva nel 1999 mostrato alcuni segni di una salita e ridiscesa dello spettro; lo stesso BOOMERANG, in un volo di prova effettuato dal Nord America nel 1998, aveva trovato fortissimi indizi della presenza di un picco. Ma ora, i risultati di BOOMERANG e MAXIMA erano di una chiarezza che spazzava il campo da ogni possibile obiezione.

Quasi dieci anni dopo COBE, i cosmologi avevano finalmente cominciato a mettere a fuoco la struttura fine della radiazione cosmica di fondo. Un picco era emerso dalla nebbia, e lo spettro cominciava a rivelare i suoi segreti. La prima e più importante delle rivelazioni era straordinaria, un sogno che i cosmologi avevano inseguito per decenni: misurare la curvatura dell'Universo. Il Cosmo è piatto come ci dice l'esperienza comune, oppure la sua struttura si ripiega su se stessa, in un modo che l'immaginazione stenta a visualizzare? Con l'uscita allo scoperto del primo picco acustico, l'umanità stava davvero iniziando a prendere le misure all'Universo.

## Un mondo piatto

Un pregiudizio tenace attribuisce a tutto il mondo antico la credenza che la Terra fosse piatta. Secondo questa diffusa convin-

zione, furono soltanto i grandi navigatori del XVI secolo, come Colombo e Magellano, a mostrare all'umanità incredula che si poteva navigare nella stessa direzione e tornare al punto di partenza, a riprova della sfericità della Terra. Ma in realtà, che la Terra fosse sferica era un fatto accettato già da molti pensatori dell'antica Grecia (come Platone e Aristotele). Chiunque poteva notare che altri corpi celesti, come la Luna e il Sole, erano rotondi, e che la Terra stessa proiettava un'ombra a forma di disco sulla Luna durante un'eclissi. Inoltre, bastava osservare una nave allontanarsi all'orizzonte per accorgersi che lo scafo spariva prima delle cime degli alberi, proprio come se il mare sotto di essa si incurvasse. Persino nel Medioevo, solitamente ritenuto un periodo oscurantista, era cosa chiara alle persone colte che la Terra è una sfera: ad esempio, Dante, nella Divina Commedia, attraversa l'Inferno e sbuca dalla parte opposta della Terra, alle pendici della montagna del Purgatorio.

La prima prova della sfericità della Terra che potremmo ritenere scientifica secondo i parametri moderni fu trovata nel III secolo a.C. da Eratostene, un ingegnoso filosofo della scuola di Alessandria. Eratostene era venuto a sapere che a Siene, una località alcune centinaia di chilometri a sud di Alessandria, il 21 giugno di ogni anno, a mezzogiorno esatto, la luce del Sole cadeva perfettamente perpendicolare al terreno: un bastone piantato nel suolo non dava nessuna ombra, e il fondo dei pozzi veniva illuminato perfettamente. Siccome lo stesso non succedeva ad Alessandria, Eratostene concluse che questo fenomeno doveva essere provocato dalla curvatura della Terra: i raggi del Sole, provenienti da un punto lontanissimo, potevano essere considerati perfettamente paralleli, e quindi dovevano essere le verticali nelle due località a essere inclinate fra loro. Dalla misura dell'angolo formato, non solo Eratostene mostrò in modo incontrovertibile che la Terra era una sfera, ma attraverso semplici calcoli geometrici arrivò a stabilirne con incredibile precisione il diametro (figura 5.1).

La combinazione di argomenti matematici e osservazioni empiriche usata da Eratostene è solo uno dei tanti meravigliosi esempi di uso del metodo scientifico da parte dei filosofi greci. Questi pensatori fecero muovere all'umanità i primi passi verso la comprensione del suo posto nell'Universo. In effetti,

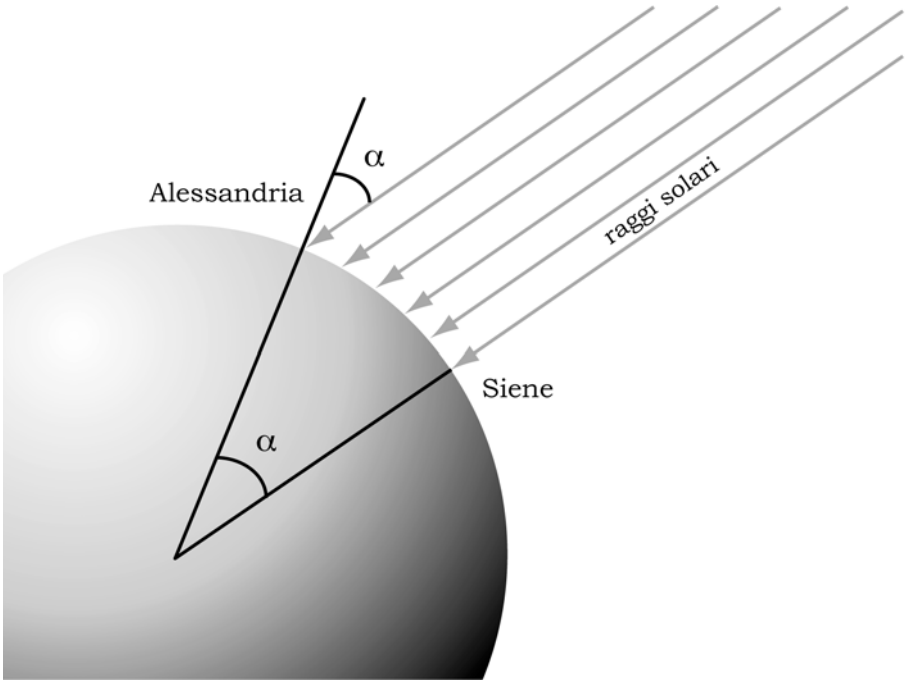



Figura 5.1: Eratostene si servì del fatto che i raggi solari colpiscono la superficie terrestre con angoli diversi in punti diversi (le città di Alessandria e Siene) per provare la curvatura del globo e misurare il raggio della Terra.

una volta che Eratostene ebbe determinata la circonferenza della Terra, poté facilmente estendere i suoi calcoli oltre i confini del nostro pianeta. Misurò il tempo che la Luna impiegava ad attraversare il cono d'ombra terrestre durante un'eclisse: da questa osservazione poté stimare il diametro della Luna usando come riferimento quello della Terra, che ora conosceva. A questo punto, calcolare la distanza della Luna fu un gioco da ragazzi. Se si osserva un disco di 1 metro di diametro da una distanza di 100 metri, si può notare che esso appare all'incirca della stessa grandezza del disco lunare. Questo significa che la distanza della Luna deve essere pari a circa 100 volte il suo diametro.

Il metodo usato da Eratostene per misurare la distanza della Luna è talmente potente, nella sua semplicità, da essere stato impiegato innumerevoli volte dagli astronomi nel corso dei seco-

li. Tutte le volte che si può determinare la dimensione apparente di un oggetto di cui si conosce anche la dimensione reale, si mettono insieme queste due informazioni per dedurne la distanza. Come abbiamo già avuto modo di notare, la determinazione delle distanze è uno dei problemi più spinosi in cosmologia, e pertanto la possibilità di conoscere contemporaneamente la dimensione reale e quella apparente di un oggetto è sempre particolarmente apprezzata.

Ovviamente, il gioco di determinare le distanze confrontando le dimensioni reali e quelle apparenti vale finché abbiamo a che fare con la familiare geometria euclidea che ci hanno insegnato da bambini. Ma quei guastafeste di Riemann e Einstein ci hanno fatto notare che l'Universo può essere un posto molto più strano. Ricorderete che, nel modello del Big Bang, lo spazio (anzi lo spaziotempo) può avere una curvatura. Questo rende per i cosmologi le cose un po' più complicate di quanto non fossero per Eratostene. Cerchiamo di capire perché con una storiella.

Supponiamo che, dalla finestra della vostra stanza, vogliate misurare quanto dista il palazzo di fronte, ma siate troppo pigri per uscire di casa. Il palazzo è esattamente identico al vostro, e la finestra di fronte alla vostra camera è larga esattamente quanto la vostra. Siccome avete appena letto le imprese di Eratostene e vi siete esaltati, vi viene un'idea ingegnosa. Prendete uno di quei puntatori laser in grado di proiettare un puntino rosso su una superficie a grande distanza. Lo poggiate sul vostro davanzale e lo direzionate in modo che punti esattamente sull'estremità destra della finestra direttamente di fronte a voi, quindi segnate la posizione del puntatore sul davanzale. Poi lo ruotate in modo che punti verso l'estremità sinistra della stessa finestra, e segnate la nuova direzione. In questo modo avete disegnato un angolo sul davanzale. Adesso tracciate una terza e ultima linea sul davanzale in modo che sia più o meno parallela alla facciata del palazzo: unendo questa nuova linea alle due tracciate prima avete ottenuto un triangolo. Per finire, misurate con un righello i lati del triangolo: il rapporto tra quello che avete disegnato per ultimo e uno dei due disegnati in precedenza è circa lo stesso che c'è fra la larghezza della finestra del palazzo di fronte (che conoscete, perché è uguale alla vostra) e la sua distanza, che potete quindi facilmente calcolare.

A questo punto, giustamente orgogliosi del successo ottenuto con la vostra pensata, vi sentite più furbi di Eratostene e decidete di chiamare un amico per vantarvi della cosa. Ma quando tentate di ripetere l'esperimento davanti a lui vi accorgete che c'è qualcosa che non va. L'angolo che misurate adesso usando la stessa tecnica di prima risulta molto più piccolo! Il fatto è che Zeus ha deciso di punirvi per la vostra superbia, e ha fatto in modo che a vostra insaputa i fotoni emessi dal laser deviassero lungo il cammino verso il palazzo di fronte, facendo una curva verso l'esterno. La vostra misura è compromessa: siccome l'angolo che misurate adesso è più piccolo, concludete che la finestra di fronte si è improvvisamente rimpicciolita, oppure che il palazzo si è allontanato! Siete sempre più confusi, vi prendete una pausa di mezz'ora e decidete di fare un'altra prova. Zeus però non ha smesso di farsi beffe di voi, e stavolta decide di far curvare i fotoni non più verso l'esterno, ma verso l'interno. Adesso l'angolo che misurate è sistematicamente più grande di prima: dovete quindi concludere che la finestra di fronte si è allargata, oppure che il palazzo si è avvicinato. Quest'ultimo insuccesso vi convince che la geometria non fa per voi. Buttate il laser in un cestino e decidete di lasciar perdere.

Se state pensando che questa storiella non abbia niente a che fare con la realtà vi state sbagliando di grosso. Zeus non c'entra niente, ma in effetti in un Universo curvo i fotoni si comportano proprio nel modo bizzarro che abbiamo appena descritto. In un Universo a curvatura positiva (simile a una sfera, per capirci), il cammino percorso da due fotoni partiti da due punti diversi segue una curva che li porta gradualmente a convergere. In un Universo a curvatura negativa (simile a una sella) accade l'opposto: i due fotoni seguono traiettorie curve lievemente divergenti. In un Universo a curvatura positiva, quindi, gli angoli misurati sembrano sempre un po' più grandi che in un Universo piatto (perché i fotoni che usate per misurare gli angoli curvano verso l'interno lungo il tragitto), mentre in un Universo a curvatura negativa sembrano sempre un po' più piccoli (perché in questo caso i fotoni curvano verso l'esterno). In altre parole, la curvatura dell'Universo agisce come una sorta di gigantesca lente deformante: a causa della deviazione del cammino dei raggi luminosi, lo stesso oggetto visto da lontano ci sembrerà più grande

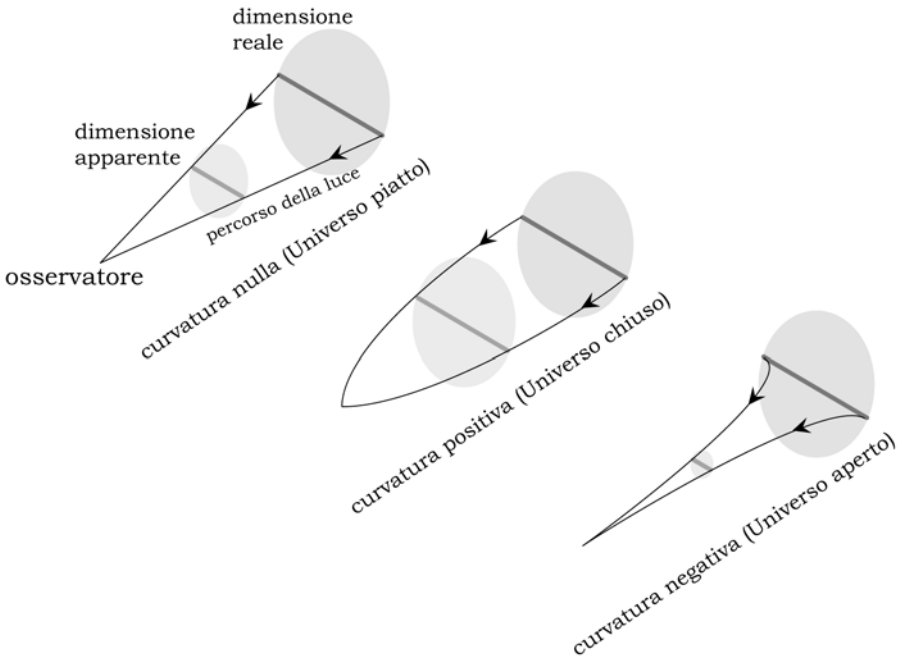



Figura 5.2: I raggi luminosi viaggiano lungo percorsi diversi a seconda della geometria dell'Universo. Quando un oggetto di una certa dimensione viene osservato da un punto molto distante (confrontabile con le dimensioni dell'Universo), la deviazione dei raggi luminosi fa apparire l'oggetto più grande in un Universo chiuso e più piccolo in un Universo aperto. Questo fatto può essere usato per misurare la geometria dell'Universo.

in un Universo chiuso che in un Universo aperto (figura 5.2).

Ovviamente, se il percorso dei fotoni è molto breve, questo effetto è completamente trascurabile. Proprio come non ci è facile accorgerci che la Terra è sferica guardando nelle nostre immediate vicinanze, così anche l'eventuale curvatura dell'Universo fa sentire i suoi effetti sul cammino percorso dai fotoni solo su distanze comparabili alla dimensione del Cosmo. Resta il fatto che se potessimo accorgerci di una deviazione nel cammino dei fotoni avremmo trovato un modo formidabile per misurare la geometria dell'Universo.

Ebbene, questa straordinaria possibilità è offerta proprio dal-

l'osservazione della radiazione cosmica di fondo, i cui fotoni hanno viaggiato per distanze abissali, attraversando buona parte dell'Universo. Una mappa delle variazioni di intensità della radiazione cosmica di fondo presenta caratteristiche ben riconoscibili: le macchie corrispondenti alle zone più calde o più fredde della media. I cosmologi possono calcolare con grande precisione la dimensione reale delle macchie, cioè quella che avevano al momento della ricombinazione. Essa dipende soltanto dalla frequenza delle oscillazioni acustiche che, a sua volta, è legata alla velocità con cui le onde sonore si propagavano nel plasma: anche questa è una quantità che si può calcolare facilmente, proprio come conosciamo molto bene la velocità del suono nell'aria. Dobbiamo quindi soltanto misurare la dimensione apparente delle macchie, e, dalla dimensione reale, potremo ricostruire il cammino esatto percorso dai fotoni, determinando così la curvatura dell'Universo.

Ricorderete che lo spettro delle variazioni di intensità della radiazione cosmica di fondo non è altro che un grafico che ci dice quanto sono intense, in media, le macchie di una certa grandezza. La curvatura dell'Universo altera la grandezza apparente delle macchie e, di conseguenza, la posizione dei picchi acustici nello spettro: se le macchie vengono ingrandite, il primo picco compare un po' più a sinistra, e viceversa. Lo spostamento della posizione dei picchi è quindi un chiaro indicatore del tipo di curvatura dell'Universo (figura 5.3). La geometria dell'Universo è svelata dalla nota con la quale canta la radiazione cosmica di fondo: basta regolare la frequenza fondamentale prevista dai calcoli in modo che coincida con quella dedotta dalle osservazioni, per stabilire con incredibile esattezza se viviamo in un Universo di tipo euclideo o meno. Non solo, ma, visto che la geometria dell'Universo è stabilita da quanta materia contiene, in questo modo avremo anche "pesato" l'Universo.

Secondo i calcoli teorici, se l'Universo fosse piatto e avessimo una vista sensibile alle microonde, osservando il cielo le macchie più intense dovrebbero apparirci grandi più o meno il doppio della Luna piena (ovvero circa 1°). Questo fu esattamente quello che balzò agli occhi dei ricercatori che osservarono per la prima volta le immagini prodotte da BOOMERANG e MAXIMA: era una chiara indicazione del fatto che il percorso dei fotoni non aveva

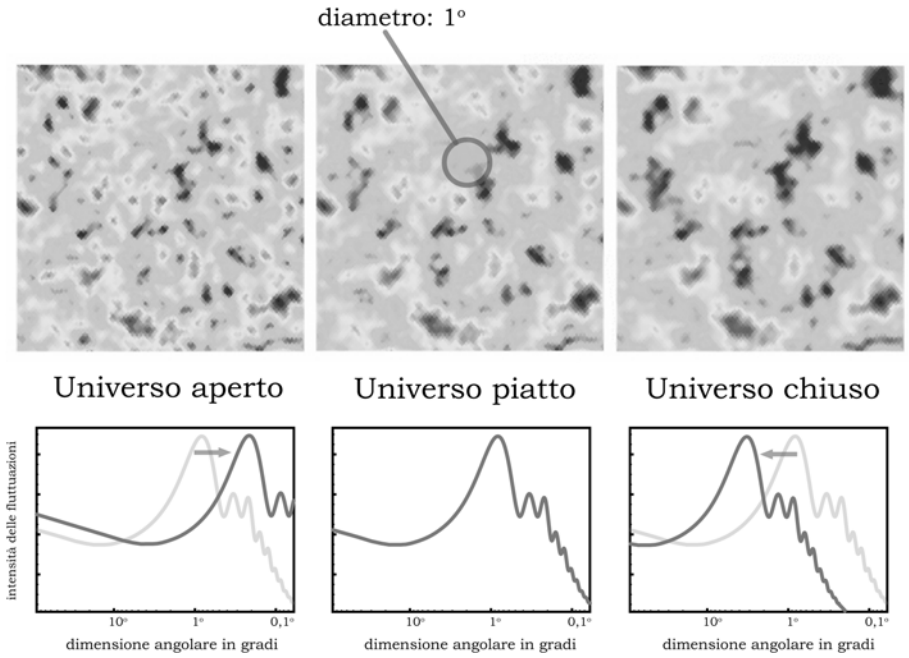



Figura 5.3: La dimensione media delle più intense fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo è fissata al momento della ricombinazione; ma, a causa della variazione nel percorso compiuto dai fotoni, appare diversa a seconda della geometria dell'Universo: circa 1° in un Universo piatto, di meno in un Universo aperto e di più in un Universo chiuso. Questo si traduce in uno spostamento nella posizione dei picchi acustici nello spettro delle fluttuazioni.

subito deviazioni lungo il tragitto fatto dalla ricombinazione a oggi.

Le prime indiscrezioni sui risultati di BOOMERANG e MAXIMA cominciarono a circolare nella comunità scientifica. Le mappe ottenute dai due esperimenti furono mostrate come risultati preliminari al congresso del 1999 della American Astronomical Society: nonostante tutta la cautela usata nel non fare affermazioni esplicite sulle implicazioni delle misure per i modelli cosmologici, per gli esperti in materia fu immediatamente chiaro, da una semplice occhiata alle immagini, che l'Universo non doveva essere troppo lontano dall'avere una geometria piatta. Il *New York Times* fu più rapido di tutti a fiutare l'importanza del-

la notizia, e aprì l'edizione del 26 novembre 1999 con un articolo in prima pagina: "Increspature nella radiazione del Big Bang illuminano la geometria dell'Universo". I *team* di BOOMERANG e MAXIMA erano però ancora restii ad alimentare questo tipo di illazioni fino a che i dati non avessero superato tutti i controlli necessari.

Quando le immagini furono finalmente analizzate con la dovuta precisione, e fu estratto lo spettro delle variazioni di intensità, il primo picco acustico cadeva esattamente nel punto previsto dalla teoria nell'ipotesi che l'Universo fosse piatto. La nota fondamentale emersa dalle misure di BOOMERANG e MAXIMA si accordava con grande precisione a quella associata a un modello di Universo con la geometria più semplice, quella per cui valgono i teoremi del buon vecchio Euclide (figura 5.4). Adesso si poteva affermare con tutta l'enfasi del caso, e con il supporto di dati di grande precisione, che l'Universo era veramente piatto, e la sua densità pari a quella critica, proprio come previsto dalla teoria dell'inflazione.

Il 27 aprile del 2000, una delle più autorevoli riviste scientifiche mondiali, la britannica *Nature*, aveva in copertina l'immagine dell'Universo primordiale ottenuta da BOOMERANG e, al suo interno, un articolo che annunciava: "Un Universo piatto dalle mappe ad alta risoluzione della radiazione cosmica di fondo". Una settimana dopo, anche MAXIMA annunciava ufficialmente i suoi risultati, che confermavano la scoperta di BOOMERANG.

La notizia fece rapidamente il giro del mondo. Le prime pagine dei giornali internazionali diedero ampio risalto alla scoperta, non mancando di sottolineare che, dopotutto, il mondo era piatto. In Italia, probabilmente anche a causa della forte presenza di ricercatori del nostro paese nei due esperimenti (una buona metà del team, nel caso di BOOMERANG), la notizia ebbe uno spazio nei media di molto superiore a quello solitamente dedicato ai fatti scientifici. Sul quotidiano *la Repubblica*, una vignetta di Massimo Bucchi raffigurava un paffuto e giocondo signore, armato di forchetta e coltello, nell'atto di esclamare "L'Universo è *piatto*!". Sottotitolo: "L'entusiasmo scientifico degli italiani".

Il cammino che hanno dovuto percorrere i cosmologi per arrivare a determinare la geometria dell'Universo è stato più lungo e faticoso di quello fatto dagli antichi pensatori greci per giunge-

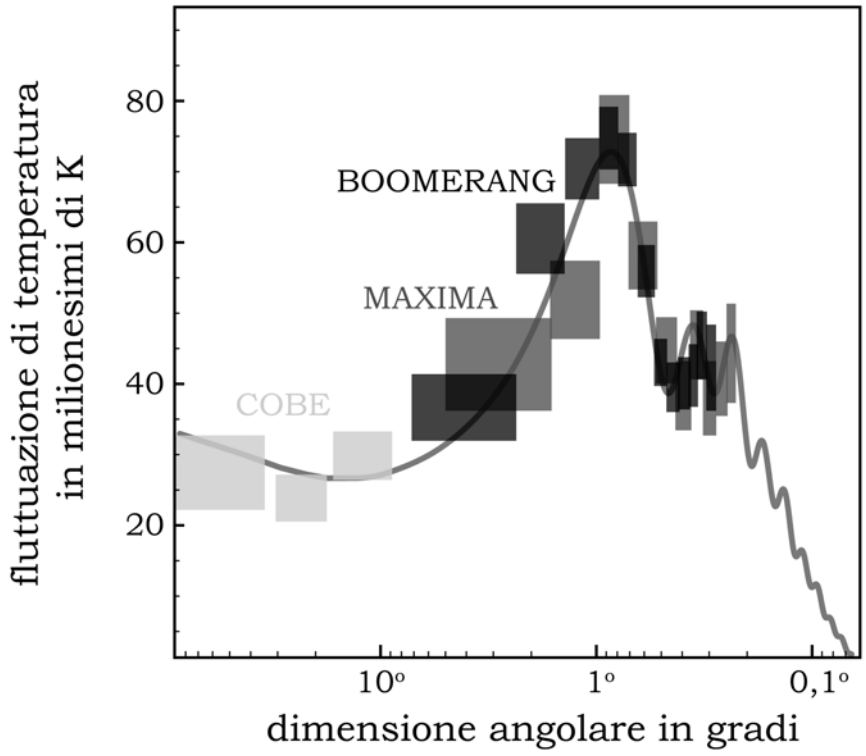



Figura 5.4: I dati di BOOMERANG e MAXIMA hanno per primi mostrato chiaramente una risalita nello spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo proprio dove i calcoli teorici prevedevano l'esistenza del primo picco acustico. La posizione del picco è quella che ci si aspetta se la geometria dell'Universo è piatta (come mostra la curva continua teorica, ottenuta proprio ipotizzando un Universo con densità totale pari a quella critica). I dati di COBE coprivano scale angolari troppo grandi e non potevano rivelare la presenza del picco. D'altra parte, BOOMERANG e MAXIMA non erano in grado di risolvere chiaramente le armoniche superiori dello spettro.

re a misurare la curvatura della Terra: ma l'ingegnoso metodo escogitato, l'elegante uso di semplici argomenti geometrici per determinare alcune delle qualità del mondo fisico, è qualcosa che Eratostene avrebbe sicuramente apprezzato. Non abbiamo avuto bisogno di circumnavigare l'Universo per capire qual è la sua geometria, così come non c'è stato davvero bisogno di Magel-

lano per dirci che la Terra è una sfera. Sono bastate osservazioni accurate, fatte senza muoverci troppo da casa nostra, per capire qualcosa di profondo riguardo alla natura del Cosmo.

## Qualcosa che sfugge

Quando Riemann nel XIX speculò per la prima volta sulla possibilità di costruire una geometria valida su qualunque tipo di superficie, l'idea che la descrizione dell'intera struttura dell'Universo potesse conformarsi alle sue ardite costruzioni matematiche dovette sembrargli estremamente remota. Diversi decenni più tardi, Einstein dimostrò l'applicabilità delle idee di Riemann alla realtà del mondo fisico, e andò ben oltre, stabilendo una corrispondenza perfetta tra il contenuto dell'Universo e la sua geometria.

Secondo il modello che Friedmann dedusse dalle equazioni di Einstein, se l'Universo è piatto, allora la sua densità totale deve essere pari a un certo valore critico. Come abbiamo già avuto modo di notare, i cosmologi hanno sempre avuto una forte predilezione per un Universo privo di curvatura, una preferenza motivata essenzialmente da pregiudizi di natura teorica. In ultima analisi, si trattava di una scelta quasi estetica, derivante dall'eleganza delle teorie inflazionarie, che prevedono in modo naturale proprio un Universo con una geometria di tipo euclideo. Le osservazioni della radiazione cosmica di fondo compiute da BOOMERANG e MAXIMA, con la misura del primo picco acustico nello spettro della anisotropie, hanno conferito la dura realtà di un fatto oggettivo a quella che era sempre stata considerata una speculazione. Questo è stato certamente un grande successo per la cosmologia, ma allo stesso tempo anche una fonte di problemi molto seri.

Sì, perché se è vero che i cosmologi teorici sono sempre stati invaghiti della semplicità di un Universo piatto, va anche detto che i loro colleghi osservativi hanno tentato in tutti i modi di riportarli con i piedi per terra. Guardate, dicevano, che l'Universo è troppo vuoto. Nell'Universo non c'è abbastanza materia per arrivare alla densità critica. L'Universo non "pesa" abbastanza. Sappiamo che se ci limitiamo a contare tutta la materia di ti-

po ordinario (cioè barionica) presente nell'Universo riusciamo ad arrivare al massimo al 5% circa della densità critica. Sappiamo inoltre che, a giudicare da una serie di forti evidenze indirette, deve esserci nell'Universo molta materia oscura non barionica: ma secondo le stime disponibili, anche mettendo insieme tutta la materia dell'Universo, barionica e non barionica, si arriva al massimo a un 30% della densità critica.

Il dilemma con il quale ci dobbiamo confrontare, costretti dalle osservazioni della radiazione cosmica di fondo, è di quelli pesanti, è proprio il caso di dirlo. Semplicemente, non sappiamo dove prendere il 70% che manca per raggiungere la densità critica. L'Universo è piatto, ma non abbiamo idea di cosa lo renda piatto. Siamo nei guai. Guai grossi.

Quando i cosmologi sono nei guai, sanno però che c'è sempre un'amica pronta a cavarli d'impaccio. Lo ha fatto più volte, negli ultimi ottant'anni. È la *costante cosmologica*.

Ricordate quando Einstein cercava disperatamente di trovare una soluzione delle sue equazioni che gli permettesse di descrivere un Universo statico? Sapete cosa fece il buon vecchio Albert? Era il 1917, erano passati due anni da quando aveva formulato una delle più grandi creazioni che la mente umana abbia mai prodotto. Riprese le sue equazioni, diede loro un'occhiata e, senza pensarci due volte, aggiunse un termine (Einstein lo definì "un piccolo miglioramento"), apparentemente del tutto innocuo, che gli desse la soluzione sperata. La nuova componente introdotta nell'Universo da Einstein, che egli indicò con la lettera greca lambda ($\Lambda$), era la costante cosmologica. Come ha argutamente osservato il cosmologo Rocky Kolb, è più o meno come se, un paio d'anni dopo averla dipinta, Leonardo avesse dato un'occhiata alla Gioconda e, per "migliorarla", le avesse aggiunto un paio di baffi.

Quando, anni dopo, Einstein si convinse finalmente che l'Universo non era statico, ma in espansione, tentò di sbarazzarsi dei baffi. Non dei suoi, ma di quelli che aveva aggiunto alla sua Gioconda. Con l'aria di uno che sa di averla fatta grossa, definì l'introduzione della costante cosmologica "la più grande cantonata" che avesse mai preso. Purtroppo, il danno era fatto, e la grande cantonata di Einstein da allora tormenta il sonno dei fisici teorici, che hanno cominciato a chiedersi se essa esista

veramente.

Per i cosmologi, costretti in qualche modo a far quadrare il conto delle componenti presenti nell'Universo, l'esistenza della costante cosmologica sarebbe una benedizione. La costante cosmologica, infatti, può essere considerata una forma di energia (diremo qualcosa di più preciso al riguardo nel capitolo 6) e pertanto la sua presenza contribuirebbe ad aumentare la densità totale dell'Universo, permettendole di raggiungere il valore critico. Mettendo insieme un 70% di costante cosmologica, e un 30% di materia, si avrebbe la ricetta perfetta per un Universo piatto. Purtroppo, una ricetta in cui entrambi gli ingredienti sembrano assai indigesti.

Il problema con la costante cosmologica è che essa ha una caratteristica che la rende un po', come dire, sgradevole. Il termine giusto sarebbe: repellente. La costante cosmologica introduce infatti nell'Universo una cosa con la quale non abbiamo mai fatto i conti, se non nei peggiori film di fantascienza: una specie di *gravità repulsiva*. Per effetto della quale, l'espansione dell'Universo, invece di rallentare sotto l'effetto dell'attrazione esercitata dal suo contenuto, a un certo punto comincia improvvisamente ad accelerare. Il momento in cui comincia questa accelerazione dipende da quanto è grande la costante cosmologica. E qui le cose si complicano ulteriormente.

Quando i fisici teorici provano a calcolare quale valore dovrebbe avere la costante cosmologica, si trovano di fronte un risultato sconcertante: un valore almeno 1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 di volte più grande della densità critica! Purtroppo, se ciò fosse vero, non ci sarebbe nessuno a rompersi il capo su questo problema, visto che l'Universo come lo conosciamo non esisterebbe. L'espansione, infatti, avrebbe cominciato ad accelerare immediatamente dopo il Big Bang, cosicché oggi il Cosmo sarebbe ormai un immenso spazio quasi completamente vuoto, in cui ogni particella di materia sarebbe separata da tutte le altre da distanze abissali.

Sembra quindi evidente che c'è qualcosa che non va nella nostra comprensione della natura della costante cosmologica. Forse qualche meccanismo fisico ancora sconosciuto agisce in modo da regolare il suo valore, rendendolo abbastanza piccolo

da evitare che l'Universo si gonfi come il bilancio di certe società di calcio, ma abbastanza grande da fornire il contributo che manca per raggiungere la densità critica. Quale possa essere questo meccanismo, però, è uno dei misteri più profondi della fisica moderna. Tutto sommato, per i fisici teorici sarebbe molto meglio che la costante cosmologica fosse davvero stato un abbaglio di Einstein.

Come la cavalleria nei film western, la costante cosmologica è apparsa più volte nel corso dei decenni per salvare la pelle dei cosmologi in difficoltà, salvo poi sparire di nuovo quando l'emergenza cessava, per essere relegata in cantina con altre inutili e imbarazzanti costruzioni dell'ingegno umano. Ma, nel 1998, essa è apparsa di nuovo all'orizzonte, annunciata da una trionfale fanfara: e stavolta sarà difficile liberarsene.

## Espansionismo cosmico

La prestigiosa rivista *Science* assegna, verso la fine di ogni anno, il titolo di scoperta scientifica più importante tra quelle fatte negli ultimi dodici mesi. Nel 1998, il passo avanti più importante nell'avanzamento della scienza veniva illustrato eloquentemente, sulla copertina di *Science*, dall'espressione stupefatta di un incredulo Albert Einstein. La sua creatura più sgradita, la costante cosmologica, era tornata alla ribalta della cronache scientifiche.

Due diversi gruppi internazionali di ricercatori, uno guidato da Saul Perlmutter, del Lawrence Berkeley National Laboratory, l'altro da Adam Riess, dello Space Telescope Science Institute, avevano osservato alcune decine di *supernovae* in altri sistemi galattici a distanze enormi dal nostro. Le supernovae sono immense esplosioni con le quali si conclude la vita di alcuni tipi di stelle. L'intensità della luce emessa nel lampo che accompagna l'esplosione di una supernova arriva talvolta a eguagliare quella dell'intera galassia che la ospita.

Ovviamente, nessuno sa quando sta per esplodere una supernova. Oltretutto, un'esplosione di supernova non è un evento molto frequente e, anche quando accade, è visibile per soli pochi mesi, passati i quali quello che resta della supernova di-

venta talmente debole da non poter essere più osservato. Così, gli astronomi che studiano questi oggetti sono costretti a procedere a caso. Osservano moltissime galassie per lunghi periodi di tempo, fiduciosi che possa capitare loro di assistere in diretta all'esplosione di una supernova.

Le supernovae osservate dai gruppi di Riess e Perlmutter erano di un tipo particolare, chiamato *tipo Ia*. Una delle caratteristiche che rende le supernovae di tipo Ia interessanti oggetti di studio, è che gli astronomi sanno determinare con grande precisione la loro luminosità assoluta, semplicemente desumendola dalla velocità con la quale si smorza la luce emessa nell'esplosione. In altre parole, le supernovae di tipo Ia sono ottime candele standard, proprio come le Cefeidi scoperte da Henrietta Leavitt che Hubble usò per determinare la distanza delle galassie. Esse, però, presentano un enorme vantaggio rispetto ad altre candele standard: sono così straordinariamente luminose che possono essere osservate anche in galassie enormemente lontane. La luce di alcune di queste supernovae è partita quando l'Universo era diversi miliardi di anni più giovane. Questo dà agli astronomi la possibilità di accorgersi delle variazioni nella velocità di espansione dell'Universo avvenute nel corso della sua evoluzione.

Sappiamo infatti che, proprio come un sasso lanciato in aria viene frenato dall'attrazione terrestre, così l'espansione dell'Universo nel modello di Friedmann viene gradualmente rallentata dal contenuto di materia. L'Universo si espandeva più velocemente nel passato che oggi. Quando Hubble aveva messo in relazione la velocità di allontanamento delle galassie con la loro distanza, aveva usato galassie abbastanza vicine alla nostra. La loro luce era partita in un'epoca relativamente recente, e l'Universo doveva espandersi alla stessa velocità allora come oggi. Ma usando le supernovae di tipo Ia per misurare la velocità di galassie lontanissime, e quindi molto antiche, è possibile accorgersi se l'Universo si espandeva a ritmi diversi nel passato più remoto.

Misurando la distanza e la velocità delle supernovae osservate, i gruppi guidati da Perlmutter e Riess si resero conto che la relazione che ne derivava non era esattamente quella che ci si aspetterebbe se l'Universo stesse decelerando. Le supernovae

più lontane sembravano essere molto meno luminose del previsto. Dopo aver scartato diverse possibili spiegazioni, i due gruppi arrivarono indipendentemente alla stessa conclusione. Le supernovae lontane sembravano meno luminose delle previsioni perché l'espansione dell'Universo aveva aumentato il suo ritmo da quando esse avevano emesso la loro luce. Invece che rallentare, l'espansione dell'Universo stava *accelerando*. Era come se il sasso lanciato in aria, invece di frenare, a un certo punto avesse deciso di accendere i razzi e scappare via. E se l'Universo accelerava, poteva esserci un solo colpevole: la costante cosmologica.

Dai dati in loro possesso, i ricercatori poterono stabilire che la costante cosmologica non doveva essere molto grande e che l'accelerazione dell'Universo doveva essere iniziata solo in tempi abbastanza recenti. Molti valori potevano essere consistenti con l'accelerazione osservata: ma essi calcolarono che, ipotizzando che l'Universo fosse piatto, la costante cosmologica necessaria a spiegare le luminosità delle supernovae osservate avrebbe dovuto costituire circa il 70% della densità critica.

Tombola. Come si dice nei romanzi gialli: "Tre indizi fanno una prova". I cosmologi avevano raccolto nel corso degli anni tre evidenze completamente indipendenti. La materia contenuta nell'Universo è circa il 30% della densità critica. Le osservazioni delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo dicono che l'Universo è piatto, e che la densità totale dell'Universo deve raggiungere il valore critico. E la luminosità delle supernovae di tipo Ia più lontane dice che il 70% che manca per ottenere la densità critica viene dalla costante cosmologica. La valutazione congiunta di due qualunque di questi indizi, porta a rafforzare il terzo; e i tre indizi sono indipendenti.

I cosmologi avevano finalmente incastrato il modello del Big Bang. Sapevano qual era la densità totale dell'Universo, e come era ripartito esattamente il peso del tutto tra le varie parti che lo compongono. Sapevano che la geometria dell'Universo era semplice, piana come quella euclidea che abbiamo imparato da bambini. Allo stesso tempo, l'evoluzione cosmica aveva avuto un sussulto imprevisto: l'Universo stava accelerando la sua espansione.

Ma ancora molti punti rimanevano da chiarire. Serviva uno

sguardo più acuto, per vedere i dettagli delle più minuscole increspature dell'Universo primordiale. Serviva un orecchio più fine, per ascoltare gli echi della creazione.

## Echi della creazione

Una delle cose che le osservazioni di BOOMERANG e MAXIMA non avevano potuto chiarire era se effettivamente lo spettro delle fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo presentasse i picchi corrispondenti alle armoniche della frequenza fondamentale, come previsto dai modelli teorici. La presenza di un picco nello spettro era un forte indizio che l'Universo primordiale fosse attraversato da onde sonore, e che queste fossero state sincronizzate inizialmente in modo da produrre uno spettro di tipo armonico, piuttosto che un rumore confuso. Ma l'unico modo per esserne certi era quello di osservare altri picchi a frequenze multiple della fondamentale. Verificare questo fatto era importantissimo, perché avrebbe dato un forte supporto all'idea che le perturbazioni primordiali fossero state prodotte durante l'inflazione. Inoltre, ricostruire la struttura dettagliata dei picchi armonici avrebbe permesso di distinguere il timbro dei vari modelli cosmologici, consentendo di misurare con precisione senza precedenti i parametri incogniti. Un solo picco era un buon indicatore della geometria dell'Universo, ma non poteva dire molto di più. L'ascolto dell'intera sinfonia cosmica avrebbe invece potuto rivelare ben altri segreti.

Nel giugno 2001, BOOMERANG e MAXIMA avevano completato una seconda analisi dei loro dati, da cui erano riusciti a distillare informazioni di qualità ancora maggiore. Spingendo al massimo l'uso delle loro sofisticate tecniche di indagine, i ricercatori dei due gruppi erano riusciti a produrre mappe di risoluzione superiore a quelle ottenute solo alcuni mesi prima. Nel frattempo, anche un esperimento da terra, DASI, operante dalle desolate distese ghiacciate del polo Sud, aveva completato l'analisi dei suoi dati. I tre esperimenti annunciarono i nuovi risultati al congresso della American Physical Society a Washington. Non solo i tre *team* avevano ottenuto un sostanziale accordo nello spettro estratto dai rispettivi dati, ma essi avevano anche

per la prima volta rivelato l'esistenza di un secondo picco, e un accenno della probabile presenza di un terzo.

L'indicazione dell'esistenza di onde sonore nell'Universo primordiale era adesso molto chiara. L'accuratezza dei dati era tale da non lasciare molto spazio a dubbi: l'inflazione aveva effettivamente agito da direttore d'orchestra cosmico, producendo oscillazioni acustiche sincronizzate, e uno spettro regolare nelle variazioni di intensità della radiazione cosmica di fondo. Ma per quanto i risultati di BOOMERANG, MAXIMA e DASI fossero straordinari, non avevano ancora raggiunto il massimo livello di precisione teoricamente possibile.

Era chiaro che la gloriosa epopea dei pionieri stava volgendo al termine. I coloni avevano avvistato la frontiera, ma adesso bisognava fare un salto di qualità, e cominciare a costruire il futuro su basi più solide. C'era bisogno di pensare più in grande per rivelare i picchi acustici con tutta la chiarezza necessaria, e dissipare le residue incertezze. Negli stessi anni in cui decine di gruppi avevano realizzato i loro esperimenti da terra e da pallone, cominciando a svelare la struttura fine della radiazione cosmica di fondo, un altro manipolo di ricercatori dell'Università di Princeton aveva pensato di raccogliere l'eredità di COBE accettando la sfida dello spazio, e aveva cominciato a progettare una nuova missione.

Lo scopo di questa missione era essenzialmente quello di mettere un bel paio di occhiali nuovi di zecca a COBE, in modo da consentirgli di osservare meglio i dettagli che gli erano sfuggiti. Naturalmente, COBE si trovava in orbita nello spazio, quindi sarebbe stato necessario un satellite completamente nuovo. Già che c'erano, i ricercatori pensarono anche di aggiornare tutta la strumentazione, in modo da rendere la vista del nuovo strumento, oltre che più acuta, anche più sensibile alle minime sfumature di temperatura.

Uno degli artefici principali di questo progetto era David Wilkinson, che aveva fatto parte del gruppo di Princeton battuto sul tempo da Penzias e Wilson nella scoperta della radiazione di fondo. Purtroppo, Wilkinson sarebbe scomparso nel settembre del 2003, poco prima che l'esperimento a cui aveva dedicato la parte finale della sua lunga carriera potesse annunciare i suoi risultati. Oggi, il satellite porta il suo nome: *Wilkinson Microwave*

Figura 5.5: Il satellite WMAP della NASA è alto 3.8 metri e largo 5 metri, per un peso di 840 chilogrammi. WMAP ha impiegato tre mesi per raggiungere l'orbita prestabilita, a circa 1 milione e mezzo di km dalla Terra, una distanza quattro volte maggiore di quella della Luna. (NASA/WMAP Science Team)

*Anisotropy Probe*, WMAP (figura 5.5).

WMAP fu lanciato dalla NASA il 30 giugno del 2001, proprio mentre BOOMERANG, MAXIMA e DASI rivelavano la presenza del secondo picco nello spettro acustico. Dopo un viaggio durato tre mesi, la navicella arrivò all'orbita stabilita, a 1 milione e mezzo di chilometri dalla Terra, circa quattro volte più lontano della Luna. Anche questo era un grosso passo avanti rispetto a COBE, che orbitava nelle tranquille vicinanze della Terra come un qualunque satellite per telecomunicazioni, ma era costretto a fare i conti con il rumore residuo provocato proprio dalla vicinanza del pianeta. Nell'aprile del 2002, WMAP aveva già raccolto

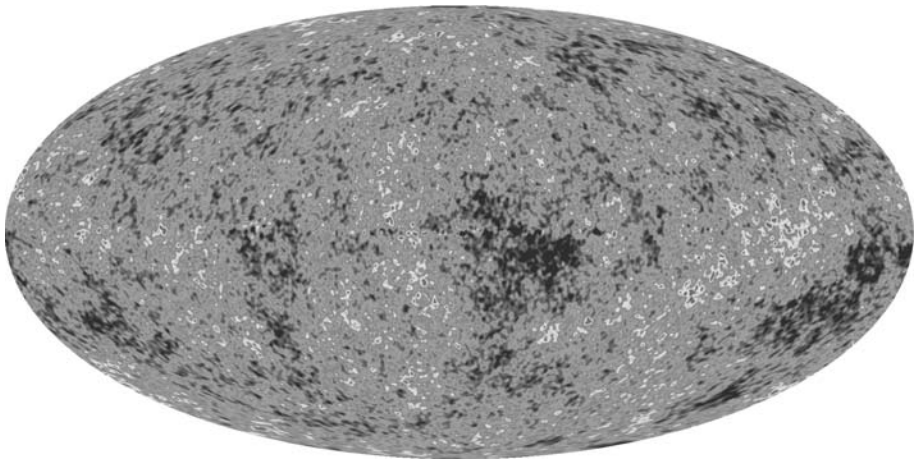


Figura 5.6: La mappa delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo ottenuta dal satellite WMAP. L'intera volta celeste è raffigurata in proiezione di Mollweide, con il piano della nostra Galassia (che è stata rimossa dall'immagine durante l'analisi) allineato lungo la dimensione orizzontale. La temperatura varia tra -200 e +200 milionesimi di Kelvin rispetto alla media. (NASA/WMAP Science Team)

abbastanza dati per creare un'immagine ad alta risoluzione della radiazione cosmica di fondo sull'intera volta celeste. I dati furono analizzati e rianalizzati per mesi per essere sicuri che non ci fossero errori. Finalmente, l'11 febbraio del 2003, l'umanità poté guardare per la prima volta la foto dell'Universo neonato scattata da WMAP (figura 5.6).

Le immagini di WMAP ci hanno mostrato l'Universo all'epoca della ricombinazione, 380 mila anni dopo il Big Bang, con un livello di dettaglio eccezionale. Sovrapponendo la mappa di WMAP a quella di COBE, la struttura coincide perfettamente. Con una piccola differenza. La mappa di COBE sembra la mappa di WMAP vista attraverso un vetro smerigliato. Per capire con un'analogia l'enorme passo avanti compiuto da WMAP, bisogna pensare che se COBE avesse osservato la Terra, invece del cielo, nella sua mappa si sarebbero potute riconoscere vagamente soltanto le forme grossolane dei tre continenti più grandi; l'Italia non sarebbe stata visibile, anzi l'intera Europa sarebbe stata solo una macchia sfuocata, quasi attaccata al Nord Africa

e praticamente impossibile da distinguere dalla enorme massa del continente asiatico.

La vista acuta di WMAP, invece, consente ora di distinguere molti più dettagli. Ogni macchia nelle mappe di COBE viene risolta in una miriade di altre macchie. Dettagli su dettagli della struttura della distribuzione di materia e radiazione nell'Universo primordiale emergono in maniera distinta. BOOMERANG, MAXIMA e DASI, è vero, avevano una vista altrettanto buona di quella di WMAP, anzi per certi versi più acuta. Ma erano limitati da altri fattori. Le mappe di questi esperimenti avevano coperto una piccola frazione del cielo, ricostruendo solo un frammento dell'intera immagine. Inoltre, tutti gli elementi di disturbo, come la contaminazione residua dell'atmosfera, il calore della Terra, le emissioni di microonde della nostra Galassia, la mancanza di stabilità del pallone, avevano contribuito a ridurre la precisione delle osservazioni.

Grazie al superbo controllo delle incertezze osservative, WMAP ha potuto ricostruire il primo picco nello spettro acustico con una precisione che fa impallidire qualsiasi altro esperimento fatto in precedenza. Il risultato di questa straordinaria misura è che WMAP ha potuto confermare che l'Universo è piatto con una precisione molto grande: la densità totale è pari a quella critica a meno di un errore del 2%.

Ma non è tutto. I dati di WMAP mostrano in maniera lampante, priva di sbavature, la presenza di un secondo picco acustico nello spettro, a una frequenza doppia di quella fondamentale (figura 5.7). Non ci sono dubbi: l'Universo prima della ricombinazione era in effetti attraversato da onde sonore. Il plasma primordiale vibrava armoniosamente come un'enorme campana, e il meccanismo che ha fatto iniziare le vibrazioni in fase può essere soltanto uno: un periodo di inflazione avvenuto una frazione di tempo inimmaginabilmente piccola dopo il Big Bang.

Lo spettro delle oscillazioni primordiali osservato da WMAP ha permesso di mettere vincoli precisi alle caratteristiche che definiscono il nostro modello di Universo, come ad esempio la ripartizione del suo contenuto complessivo. WMAP conferma che, se l'Universo è piatto come sembra, materia oscura e costante cosmologica devono dividersi la torta della creazione in modo impari: l'Universo è fatto solo per 1/3 circa di materia, mentre i

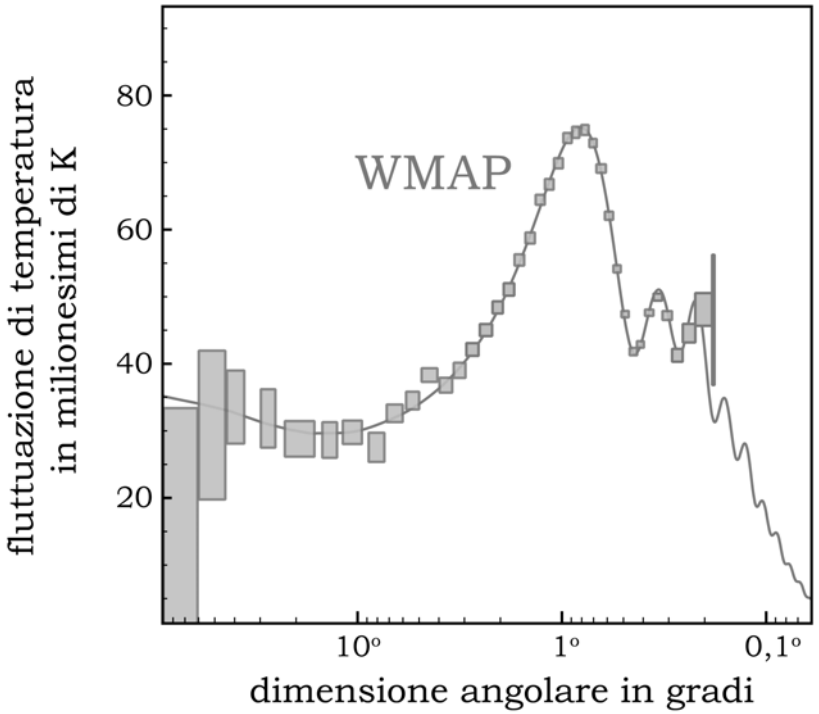



Figura 5.7: I dati di WMAP ricostruiscono lo spettro delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo con grande precisione, evidenziando chiaramente la presenza dei primi due picchi acustici. L'accuratezza a frequenze più alte non è ancora tale da rivelare le armoniche successive. A frequenze molto basse, invece, il segnale sembra meno intenso di quanto previsto dai modelli teorici. (Figura ottenuta da dati NASA/WMAP Science Team, disponibili sul sito http://lambda.gfsc.nasa.gov)

restanti 2/3 sono sotto forma di una misteriosa forma di energia repulsiva, qualcosa che assomiglia molto alla costante cosmologica di Einstein. Per essere precisi, la ricetta per l'Universo piatto trovata da WMAP è: 26% di materia (includendo sia la materia barionica che quella non barionica) e 74% di costante cosmologica. Se fino all'annuncio dei risultati di WMAP, nonostante le brillanti conclusioni dedotte dalle osservazioni delle supernovae di tipo Ia, alcuni cosmologi ancora si chiedevano se davvero ci fosse bisogno di tirare fuori dalla cantina la costante cosmologi-

ca, adesso la prospettiva è cambiata completamente. Non bisogna più chiedersi se c'è una costante cosmologica nell'Universo: bisogna cominciare a chiedersi cos'è. Uno dei grandi vecchi della cosmologia mondiale, John Bahcall, intervenendo alla conferenza stampa ufficiale di WMAP ha sintetizzato la cosa in questo modo: "WMAP vede il mondo così com'è. Per quanto strano possa sembrare, dovremo cercare di capire quest'Universo. Non abbiamo scelta".

WMAP ha anche ottenuto una misura estremamente accurata dell'abbondanza cosmica di barioni dal confronto fra l'altezza dei primi due picchi acustici. Questa misura è in ottimo accordo con quella dedotta dai calcoli della nucleosintesi primordiale. È bene sottolineare che, mentre la misura della quantità di barioni ottenuta da WMAP si basa sulla fisica delle oscillazioni acustiche del plasma primordiale, quella derivante dalla nucleosintesi sfrutta la fisica delle reazioni nucleari avvenute nei primi tre minuti dopo il Big Bang, durante i quali sono stati cucinati i nuclei degli elementi leggeri. Il fatto che le due misure siano consistenti tra loro è una prova che il modello che stiamo adottando per descrivere l'Universo è appropriato, dal momento che esso risulta in grado di fare previsioni corrette che riguardano fenomeni indipendenti e avvenuti in epoche completamente diverse. Allo stesso tempo, questi risultati confermano che la materia ordinaria, di cui sono fatti gli atomi, i pianeti, le stelle e noi stessi, è solo un misero 4% di tutto quello che c'è nell'Universo. Il restante 96% del contenuto dell'Universo è oscuro. Oscuro perché non lo vediamo, ma anche perché non abbiamo la più pallida idea di cosa sia.

Sappiamo ormai da secoli che il nostro pianeta non si trova al centro dell'Universo, ma ruota intorno a una comunissima stella come ce ne sono miliardi nella nostra Galassia. La nostra stessa Galassia, in cui occupiamo una posizione periferica, non è che una tra le centinaia di miliardi che possiamo osservare nell'Universo. Ora sappiamo che non soltanto il nostro posto nel mondo non è privilegiato, ma che non siamo neanche fatti della stessa sostanza di cui è fatta la maggior parte dell'Universo.

Per finire, i risultati di WMAP hanno permesso di ottenere una stima molto precisa dell'età dell'Universo: 13,7 miliardi di anni, con un'incertezza di appena 200 milioni di anni. Soltanto

un anno prima dei risultati di WMAP, l'incertezza sull'età dell'Universo era di ben 2 miliardi di anni. Ne è passata di acqua sotto i ponti, da quando il modello del Big Bang e i dati ottenuti da Hubble portavano a concludere che l'Universo era più giovane della Terra!

Quaranta anni di studi della radiazione cosmica di fondo, culminati con i risultati di WMAP, hanno segnato l'ingresso della cosmologia nell'era della precisione. Essere riusciti a misurare il valore dei parametri fondamentali dell'Universo, con un'accuratezza che fino a pochi decenni fa sarebbe sembrata impensabile, è un trionfo di proporzioni epocali per la cosmologia. Tutto quello che i cosmologi hanno faticosamente messo in piedi in ottant'anni di speculazioni e ricerche, l'enorme costruzione teorica iniziata da Einstein, e continuata da Friedmann, Lemaître, Gamow, e da tutti gli scienziati che hanno dedicato i loro studi alla comprensione dell'Universo, è rimasta in piedi, maestosa, dopo aver superato una dopo l'altra tutte le sfide osservative che le sono state poste. Il fatto che il modello del Big Bang abbia superato indenne la prova del fuoco di misure così precise ci rende confidenti che esso non sia soltanto un altro mito, ma possa davvero essere una descrizione accurata della realtà, qualcosa che ci avvicina a comprendere il modo in cui l'Universo realmente è, a cogliere qualcosa della verità che esiste al di là delle nostre creazioni mentali. E persino l'inflazione, che solo vent'anni fa era sembrata più simile a un'idea della fantascienza che a una teoria falsificabile, è uscita rafforzata dalle osservazioni di WMAP.

Dopo l'annuncio da parte di WMAP dell'esistenza delle onde sonore nell'Universo primordiale, qualcuno si è anche divertito a cercare di riprodurre la "musica del Big Bang". John Cramer, professore di fisica all'Università di Washington, ha dato in pasto al proprio computer lo spettro di WMAP perché lo convertisse in un suono percepibile dall'orecchio umano. Il risultato somiglia molto di più al rombo di un jet che a quello di un'esplosione, e ancora di meno a quello di un'arpa angelica. Per i curiosi, il *file* con la riproduzione del suono sintentizzato da Cramer si può scaricare da Internet[1].

[1] Il sito è: http://faculty.washington.edu/jcramer/BBSound.html

Il suono prodotto dalle onde acustiche nel plasma primordiale può non somigliare molto a una melodia celeste. Ma ci ha svelato un'armonia altrettanto bella e profonda di quella prodotta dalle più sublimi sinfonie create dall'uomo.

# ·6·

# Terra incognita

*Non cesseremo di esplorare*
*E alla fine di tutto il nostro cercare*
*Arriveremo al punto di partenza*
*E lo conosceremo per la prima volta.*

T. S. Eliot, *Quattro quartetti*

Gli straordinari risultati ottenuti negli ultimi anni, e descritti nei capitoli precedenti, potrebbero portarci a pensare che lo studio della radiazione cosmica di fondo abbia ormai detto tutto quello che c'era da dire. Niente potrebbe essere più lontano dalla realtà. Per strano che possa sembrare, WMAP ha raccolto appena il 10% dell'informazione che si pensa sia contenuta nelle fluttuazioni di temperatura del fondo cosmico. Il fatto che le conseguenze per la cosmologia siano state comunque eccezionali la dice lunga su quanto oro possa ancora essere estratto da questa straordinaria mineria di informazioni. Inoltre, come vedremo più avanti, esiste una nuova frontiera dell'investigazione della radiazione di fondo che, al momento, è essenzialmente inesplorata, e che sarà l'obiettivo di nuove future osservazioni.

Proprio per ottenere il massimo dall'immenso potenziale racchiuso nello spettro delle fluttuazioni del fondo cosmico, l'ESA ha in programma un nuova missione spaziale, il satellite Planck (dal nome del grande scienziato che per primo formulò la teoria del corpo nero) che dovrebbe essere lanciato nel 2008 (figura

6.1). Planck è stato pensato per ottenere essenzialmente tutta l'informazione contenuta nello spettro: la sua vista sarà talmente acuta da distinguere anche i più minuti dettagli, le più tenui variazioni di temperatura dei fotoni primordiali. Questo consentirà di ricostruire lo spettro fino alle frequenze più alte, quelle oltre le quali ci si aspetta che le oscillazioni del plasma siano state completamente smorzate. Le possibilità offerte da questi risultati sarebbero straordinarie: ad esempio, i parametri cosmologici potrebbero essere determinati con una precisione migliore dell'1%. Un'accuratezza senza precedenti, che consentirà di fissare con incredibile dettaglio le proprietà del modello cosmologico del Big Bang.

Planck potrà anche tentare di risolvere molti problemi ancora aperti in cosmologia. Proviamo allora a vedere da vicino quali altre sorprese possiamo attenderci nel prossimo futuro.

## Il lato oscuro del Cosmo

La misura dello spettro delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo ci ha dato la possibilità di fare un primo inventario dei costituenti del nostro Universo. Grazie a WMAP e agli esperimenti che lo hanno preceduto, sappiamo oggi che il Cosmo è fatto solo in piccolissima parte del tipo di materia che ci è familiare, quella atomica. La fetta più grande della torta sembra invece dominio di componenti misteriose, invisibili alle osservazioni astronomiche tradizionali, e rivelabili solo attraverso la loro influenza gravitazionale. Questo lato oscuro del Cosmo resta, per il momento, un territorio largamente inesplorato.

Abbiamo già visto, nel capitolo 3, come i cosmologi e i fisici delle particelle ritengano che una parte della massa invisibile dell'Universo possa essere composta da particelle massicce e debolmente interagenti. Per poter inchiodare uno dei candidati a ricoprire il ruolo di "particella misteriosa" è cruciale conoscere con grande precisione la quantità totale di materia oscura presente nell'Universo. Lo spettro delle fluttuazioni della radiazione di fondo porta impressi nell'altezza dei picchi acustici i segni del contenuto di materia barionica e non barionica. La capacità di distinguere il contributo degli atomi alla massa totale dell'Uni-

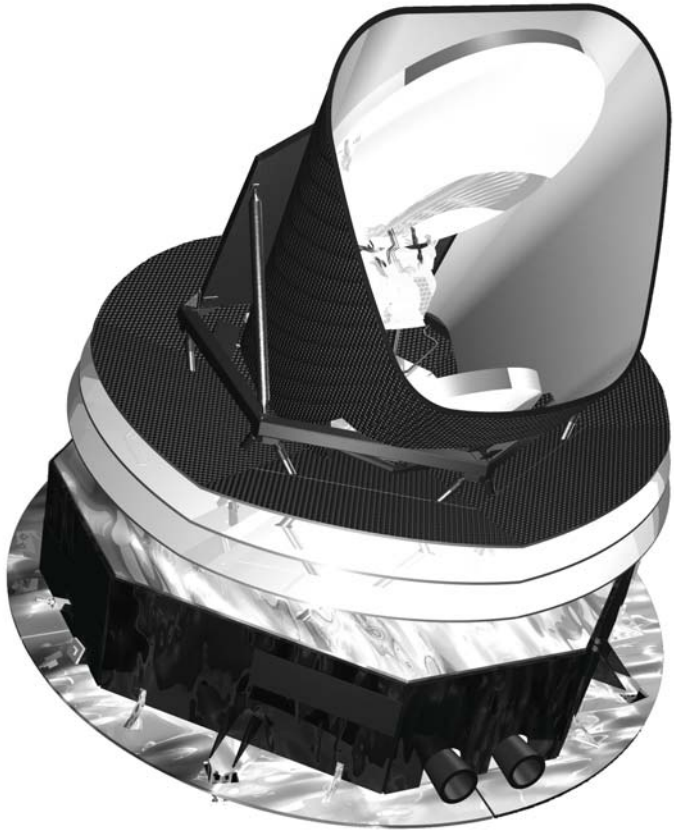


Figura 6.1: Il satellite Planck, dell'ESA, sarà la missione definitiva per lo studio delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo. Il lancio è previsto per il 2008. (Alcatel/ESA)

verso da quello delle misteriose particelle che costituiscono la materia oscura, è però strettamente legata alla misurazione accurata dell'altezza del terzo picco acustico. Come accennato nel capitolo 4, infatti, è proprio il terzo picco quello che risente maggiormente della minore o maggiore presenza di materia oscura non barionica.

Purtroppo, al momento abbiamo solo misure preliminari dello spettro nella regione del terzo picco acustico. WMAP ha osservato il fondo cosmico ormai per più di tre anni, ma la sua vista non è sufficientemente acuta per risolvere dettagli che consen-

tano di ricostruire l'informazione a scale angolari così piccole. La misura della quantità di materia oscura ottenuta da WMAP è ancora affetta da incertezze piuttosto consistenti. Le osservazioni del satellite Planck potranno fare maggiore chiarezza sul contributo effettivo delle misteriose particelle debolmente interagenti alla massa dell'Universo. Combinando queste informazioni con quelle ottenute da altri mezzi di indagine (astrofisici e no) si potrà forse finalmente riuscire a risolvere l'enigma della materia oscura.

L'inquilino più scomodo del nostro Universo, tuttavia, è senza dubbio la costante cosmologica, che, come abbiamo visto nel capitolo 5, è tornata recentemente in auge come possibile spiegazione dell'espansione accelerata. È venuto quindi il momento di dire qualcosa in più su questa strana componente. Cos'è esattamente la costante cosmologica? È solo un termine puramente matematico escogitato da Einstein per ottenere un Universo statico, oppure ha un significato fisico reale?

I fisici teorici oggi pensano che la costante cosmologica vada interpretata come la *densità di energia del vuoto*. Per capire cosa questo significhi, bisogna prima farsi un'idea di cosa sia il vuoto, cosa non facile, anche se il paragone con il contenuto di certe trasmissioni televisive viene spontaneo. Si deve immaginare il vuoto come quello che resta dopo che abbiamo tolto tutto il contenuto dall'Universo. Proprio tutto: protoni, neutroni, elettroni, fotoni, pianeti, stelle, cosmologi... Cosa resta? Se avete risposto "Nulla" siete molto lontani dalla realtà.

Secondo la fisica moderna, il vuoto, visto da molto vicino, non è affatto vuoto: è un magma ribollente di energia, un mare che brulica di un'infinità di particelle "virtuali" create e distrutte in microscopiche frazioni di tempo. Questo è possibile perché la meccanica quantistica (ricordate il principio di indeterminazione?) non permette di stabilire contemporaneamente l'energia di una particella e la durata della sua vita. Se la particella vive per un tempo brevissimo, può trarre letteralmente dal nulla l'energia sufficiente per la sua creazione.

Questa continua creazione e annichilazione di particelle virtuali fa sì che, anche in completa assenza di materia, il vuoto (se vogliamo, lo spaziotempo stesso) abbia un'energia minima non nulla (detta anche *energia di punto zero*). Purtroppo, al mo-

mento nessuna teoria è in grado di calcolare quanto dovrebbe essere grande questa energia e, quindi, di assegnare un valore alla costante cosmologica. O meglio: le stime che la fisica teorica è in grado di produrre sono, come abbiamo già detto, grossolanamente sbagliate rispetto al valore della costante cosmologica che effettivamente osserviamo nell'Universo. Questa discrepanza è uno dei più grandi misteri della fisica moderna. Alcuni fisici pensano che essa sia dovuta al fatto di non essere ancora riusciti a unire in un quadro coerente la teoria della gravitazione di Einstein, che descrive l'Universo su scale enormemente grandi, e la meccanica quantistica, che descrive il mondo dell'infinitamente piccolo.

Un altro aspetto che rende la presenza di una costante cosmologica un boccone duro da mandare giù è che essa è, appunto, costante. Mentre la densità di materia (barionica o non barionica) diminuisce sempre di più con l'espansione dell'Universo (proprio come la densità di un gas diminuisce se aumentiamo il volume del recipiente che lo contiene), l'energia del vuoto ha un comportamento completamente diverso: essendo associata allo spaziotempo stesso, essa aumenta con l'espansione dell'Universo, e il suo aumento va di pari passo con quello del volume. Pertanto, la sua densità (il rapporto tra energia e volume) resta costante. Il valore attuale della costante cosmologica dovrebbe quindi essere lo stesso di quello che era in tempi molto remoti.

Il motivo per cui questo è un problema è che il valore della costante cosmologica stabilisce l'epoca in cui l'espansione dell'Universo inizia ad accelerare. Infatti, soltanto quando la densità di materia è scesa al di sotto della densità di energia del vuoto quest'ultima comincia a dettare le regole del gioco: a quel punto la costante cosmologica può esibire a pieno le sue proprietà repulsive, e la dilatazione dello spazio procede a un ritmo incalzante. Le osservazioni di supernovae distanti mostrano che l'accelerazione è iniziata soltanto in tempi relativamenti recenti nell'evoluzione del Cosmo. Questa appare come una coincidenza molto sospetta: se la costante cosmologica non evolve, qual è il meccanismo che ne ha fissato il valore negli istanti iniziali dell'Universo in modo che l'espansione cominciasse ad accelerare solo molti miliardi di anni più tardi? Perché l'Universo non ha cominciato ad accelerare immediatamente dopo il Big Bang,

accrescendo ogni distanza così vertiginosamente da togliere non solo alle galassie, ma persino agli stessi atomi, la possibilità di formarsi?

Per spiegare quella che sembra una capricciosa casualità, alcuni ricorrono al cosiddetto *principio antropico*. Secondo questa interpretazione, alcune delle proprietà che osserviamo nell'Universo dipendono dal fatto che, se esse fossero diverse, la nostra presenza non sarebbe possibile e non saremmo qui a parlarne. In altre parole, per un pesce non dovrebbe essere sorprendente accorgersi che il suo mondo è fatto in larga parte di acqua. Per quanto ci riguarda, se il valore della costante cosmologica fosse stato poco più grande di quello osservato, l'espansione avrebbe iniziato ad accelerare subito dopo il Big Bang, rendendo in breve tempo l'Universo una distesa desolata: ma, se questo fosse accaduto, oggi nessuno sarebbe nelle condizioni di scriverci un libro. Quindi, la costante cosmologica avrebbe il valore che ha, fra i tanti teoricamente possibili, soltanto perché esso è compatibile con la presenza di osservatori intelligenti nell'Universo. Il principio antropico sembra però a molti una via di mezzo tra una banale constatazione e un modo per evitare di trovare una risposta al problema ("Papà, perché il Sole brilla?" "Perché altrimenti non si vedrebbe niente. Adesso zitto e finisci gli spinaci").

Visti i notevoli problemi di natura concettuale associati alla costante cosmologica, negli ultimi anni si sono esplorati diversi meccanismi alternativi per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo. Una soluzione molto di moda è basata sull'introduzione nell'Universo di una nuova componente, chiamata anche *quintessenza*[1]. Questa componente, una specie di fluido cosmico diffuso omogeneamente in tutto l'Universo, avrebbe caratteristiche molto simili a quelle di una costante cosmologica (gravità repulsiva, con conseguente espansione cosmica accelerata) ma con alcuni vantaggi, come quello di non avere una densità di energia costante. Questo allevierebbe il problema della coincidenza, perché renderebbe possibile l'esistenza di meccanismi che, partendo da un ventaglio molto ampio di condizioni iniziali, regolino la densità della quintessenza in modo che l'espansione

[1] Il nome quintessenza deriva dal quinto elemento postulato da Aristotele, secondo il presupposto che la natura aborre il vuoto.

accelerata avvenga proprio nell'epoca cosmica attuale. In questi nuovi scenari, la costante cosmologica non è che uno dei tanti tipi di *energia oscura*: una denominazione volutamente vaga che include tutti gli ipotetici candidati teorici inventati per spiegare l'espansione accelerata dell'Universo.

Una delle conseguenze della presenza di energia oscura è quella di rendere di fatto impossibile prevedere quale sarà l'evoluzione futura dell'Universo. Quando nel capitolo 1 abbiamo descritto la connessione tra il modo in cui l'Universo si espande e il suo contenuto, un'espansione accelerata non rientrava in nessuno dei tre comportamenti che avevamo illustrato. Questo era dovuto al fatto che non avevamo contemplato la possibilità che esso potesse essere in parte costituito da una componente con gravità repulsiva. Se invece si ammette questa eventualità, il legame tra la geometria dell'Universo, il modo in cui si espande, e il suo destino futuro diventa più complicato. A seconda del tipo di energia oscura che esso contiene, un Universo piatto potrebbe continuare ad espandersi all'infinito, ma potrebbe anche a un certo punto invertire l'espansione e ricollassare su se stesso (ad esempio se l'energia del vuoto fosse negativa, invece che positiva come si è soliti supporre). In alcuni casi, l'accelerazione potrebbe continuare per sempre e isolare inesorabilmente la nostra Galassia da tutte le altre, facendole uscire dal nostro orizzonte. In casi estremi, l'espansione potrebbe accelerare a tal punto da fare a pezzi, tra qualche miliardo di anni, la nostra Galassia, il Sistema Solare e persino gli stessi atomi. Finché non avremo una teoria affidabile che chiarisca la causa fisica dell'espansione accelerata, non riusciremo a stabilire in modo certo il destino futuro del nostro Universo.

Oggi, i cosmologi sperano che maggiori indizi sulla natura dell'energia oscura possano venire nel prossimo futuro da ulteriori osservazioni cosmologiche. Il metodo più promettente è semplicemente quello di cercare un grande numero di supernovae di tipo Ia a distanze sempre più elevate. Alcune missioni spaziali pensate per questo scopo sono attualmente in fase di studio. Quale contributo può dare l'osservazione della radiazione cosmica di fondo alla soluzione del mistero dell'energia oscura?

Le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo sono rima-

ste impresse al momento della ricombinazione, avvenuta appena 380 mila anni dopo il Big Bang. L'energia oscura, invece, comincia a essere importante dal punto di vista cosmologico solo molto più tardi, quando la densità di materia nell'Universo è diminuita a sufficienza. Come abbiamo già detto, l'inizio dell'accelerazione sembra essere un fatto abbastanza recente, probabimente avvenuto diversi miliardi di anni dopo la ricombinazione. Quindi, quando si è prodotto lo spettro acustico, l'energia oscura aveva una densità piccolissima rispetto a quella della materia, e il suo effetto sulle oscillazioni era perciò completamente trascurabile. Sembrerebbe allora che non possa esserci nessuna traccia nella struttura dei picchi che possa aiutarci a chiarire il mistero della accelerazione cosmica. Fortunatamente, però, le cose non stanno esattamente così.

Quando l'energia oscura comincia a spadroneggiare, nell'Universo si stanno già formando le strutture cosmiche di cui abbiamo parlato più volte in precedenza. Queste strutture alterano con la loro enorme concentrazione di massa la curvatura locale dello spaziotempo. Poiché le strutture si estendono su regioni di spazio molto grandi, i fotoni della radiazione cosmica di fondo impiegano un arco di tempo abbastanza lungo per attraversarle. Quando ha inizio l'espansione accelerata, le perturbazioni nella curvatura causate dalle concentrazioni di massa subiscono un radicale mutamento. Questo mutamento lascia una traccia nei fotoni che si trovano ad attraversare la regione interessata, una traccia che può aiutare a chiarire il meccanismo responsabile dell'accelerazione cosmica.

Per capire perché, possiamo visualizzare la situazione immaginando i fotoni che entrano in una specie di buca (la curvatura dello spazio provocata dalla massa delle strutture) e così facendo guadagnano energia (come una pallina che aumenta la sua velocità rotolando per una discesa). Dopo aver raggiunto il fondo della buca i fotoni cominciano a risalire dalla parte opposta, e quindi perdono energia. Se la buca resta immutata, perfettamente simmetrica sui due lati, quando i fotoni finalmente ne fuoriescono hanno perso tutta l'energia guadagnata durante la discesa, e saranno esattamente nelle stesse condizioni di partenza. Ma se la buca cambia forma mentre i fotoni la attraversano il discorso si fa interessante. I fotoni possono ritrovarsi con

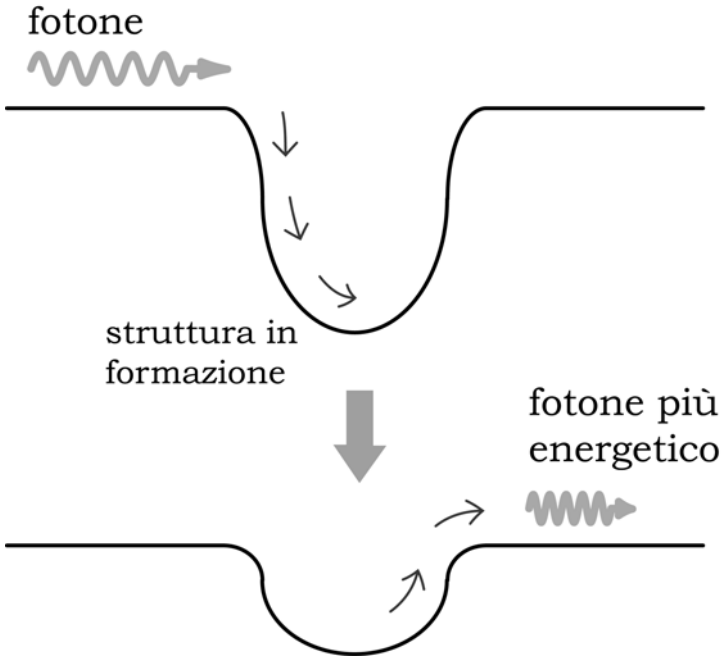



Figura 6.2: Quando i fotoni della radiazione cosmica di fondo attraversano una regione in cui sta avvenendo un mutamento nella curvatura locale dello spaziotempo (a causa della presenza di una struttura in formazione) possono guadagnare (o perdere) energia. Questo effetto è particolarmente marcato quando l'energia oscura comincia ad accelerare l'espansione dell'Universo.

più o meno energia quando escono dalla buca, rispetto a quella che avevano quando sono entrati (figura 6.2). Essi appariranno quindi più caldi o più freddi, e questo si tradurrà in macchie più o meno intense della media nelle immagini della radiazione di fondo. Essendo causate da un fenomeno che avviene più vicino a noi, le macchie avranno in generale una dimensione sul cielo maggiore di quelle prodotte al momento della ricombinazione dalle oscillazioni acustiche. Esse andranno quindi ad alterare la regione dello spettro corrispondente alle frequenze più basse, quella che normalmente dovrebbe essere priva di picchi. Il mutamento dello spettro causato da questo effetto è piuttosto sottile, ma può essere misurato usando tecniche di analisi sofisticate.

Alcuni studi recenti condotti sulle mappe di WMAP hanno in effetti confermato quello che ci si aspetta teoricamente: la distribuzione dei fotoni della radiazione cosmica di fondo sembra essere stata alterata dopo la ricombinazione, in un modo che può essere spiegato proprio dalla presenza di qualche tipo di energia oscura, anche se per il momento non è possibile stabilire con precisione quale. La cara vecchia costante cosmologica è ancora un candidato perfettamente plausibile, ma anche un vasto insieme di modelli alternativi non può ancora essere escluso con certezza. Inoltre, c'è sempre la possibilità che la spiegazione dell'accelerazione debba essere cercata in qualche altro tipo di fenomeno, per esempio nella modifica di qualche aspetto della teoria della gravitazione di Einstein. I dati del satellite Planck, insieme a quelli di altri strumenti di osservazione cosmologica, consentiranno nel prossimo futuro di approfondire ulteriormente questo tipo di indagini.

## L'Universo e il pallone da calcio

La posizione del primo picco acustico nello spettro delle anisotropie del fondo cosmico, determinata con grande precisione da WMAP, ha finalmente chiarito la questione di quale sia la geometria dell'Universo. Il nostro Universo sembra avere, in un certo senso, il tipo più semplice di geometria possibile, quella euclidea. L'Universo è piatto: due rette parallele non si incontrano mai, la somma degli angoli interni di un triangolo fa 180°, ecc.

Nei miti arcaici che raffiguravano la Terra come una superficie piatta, esisteva un limite del mondo, un confine fisico, un punto oltre il quale non si poteva andare. Per gli egizi, il cielo era una specie di cupola che si congiungeva con la Terra ai confini remoti del mondo: per i primi miti greci, la Terra era un disco piatto circondato da un fiume. Ancora oggi, impropriamente usiamo l'espressione "ai quattro angoli del mondo", come se la Terra fosse un quadrato. In un'ottica moderna, l'idea di un mondo che abbia confini fisici suona abbastanza innaturale. Un mondo che abbia un bordo deve anche avere un centro, e questo fatto distrugge completamente ogni ipotesi che tutti i punti dello

spazio siano equivalenti: qualcuno dovrebbe trovarsi al centro del mondo, in barba a Copernico.

Se non vogliamo essere costretti a immaginare di vivere in un bizzarro Universo dotato di bordo, non possiamo far altro che concludere che, se lo spazio è piatto, deve anche essere infinito. Uno spazio senza bordi, senza confini, e senza centro: dove tutti i punti sono perfettamente equivalenti. L'unico limite naturale sarebbe l'orizzonte: che però non sarebbe il confine del Cosmo, ma solo il confine di quello che, a ogni istante, possiamo osservare.

L'idea di un Universo infinito non ha mai turbato eccessivamente i sonni dei cosmologi. Per certi versi, questo è un fatto molto strano. Siamo abituati a pensare che nulla, in natura, sia infinito: tuttavia, siamo facilmente disposti ad ammettere che l'Universo possa esserlo. Ma la natura aborre gli infiniti, e con buona ragione.

In un Universo infinito, ogni possibile evento può avvenire. In effetti, in un Universo infinito ogni possibile evento avviene davvero. Non solo, ma avviene un infinito numero di volte. Mentre sto scrivendo queste righe, altrove, in un punto inaccessibile, infinitamente lontano ed esterno al nostro orizzonte, una replica esatta di me stesso in un pianeta perfettamente identico al nostro sta scrivendo le stesse identiche parole, commettendo un errore di ortografia. Da un'altra parte, un altro me stesso fa la stessa cosa, ma indossa una felpa rossa invece che nera. Un altro ha gli occhi azzurri. Una replica di voi stessi sta leggendo *La biblioteca di Babele* di Jorge Luis Borges invece di questo libro (e forse dovreste farlo anche voi...). Un'altra sta leggendo un libro che non è mai stato scritto sulla nostra Terra. Non so voi, ma io trovo l'idea di un Universo infinito estremamente fastidiosa. Ma la natura, ovviamente, non bada alla nostre preferenze personali.

In realtà, comunque, noi non sappiamo se l'Universo è perfettamente piatto, e non lo sapremo mai. Il caso a curvatura nulla, lo ricorderete, è un caso critico, corrispondente a un unico preciso valore della densità totale dell'Universo. Le nostre misure, per quanto accurate, sono comunque affette da una certa imprecisione, che diventerà più piccola man mano che avremo dati migliori, ma non potrà mai sparire del tutto. Perciò tutto

quello che possiamo dire (e che potremo mai sperare di dire) è che l'Universo è molto vicino alla piattezza, e che la porzione di Universo osservabile non mostra grandi segni di deviazione da una geometria di tipo euclideo. D'altra parte, l'Universo potrebbe essere curvo in maniera impercettibile, per esempio con una curvatura positiva così piccola da essere fuori della portata delle nostre osservazioni. Un Universo del genere sarebbe chiuso, e quindi finito, ma all'interno del nostro orizzonte apparirebbe piatto, e quindi lo riterremmo (sbagliando) infinito.

Tuttavia, c'è anche un modo in cui l'Universo potrebbe essere piatto, senza confini e bordi, ma non infinito. Un Universo del genere, pur avendo una geometria di tipo euclideo, sarebbe soltanto molto grande, ma finito. Questo è possibile perché la teoria della relatività generale di Einstein lega indissolubilmente la geometria dell'Universo al suo contenuto, ma lascia completamente libera la sua *topologia*. La topologia è un modo inventato dai matematici per classificare le figure geometriche in base ai tagli e ai buchi che bisogna fare per passare da una forma all'altra. Una ciambella è topologicamente identica a una tazzina da caffè: hanno lo stesso numero di buchi. Partendo da una ciambella di pongo potreste farla diventare una tazzina senza fare nessun nuovo buco, ma solo deformandola.

Sebbene la geometria dell'Universo, cioè essenzialmente la sua curvatura, sia fissata dalle osservazioni, ci sono tanti modi di ottenere la stessa curvatura usando topologie diverse. Questo permette di dare anche a un Universo piatto una forma "compatta", e quindi finita, senza però introdurre alcun bordo. Cerchiamo di capire come ciò sia possibile ricorrendo come al solito a un esempio in due dimensioni.

Dobbiamo per prima cosa costruire un toro partendo da un foglio di carta. Alt. Lasciate perdere il vostro manuale degli *origami*. Toro è il nome che i matematici danno a quello che tutti gli altri esseri umani chiamano ciambella (chissà poi perché). Io, da piccolo, al mare usavo una ciambella. I miei amici matematici usavano un toro. Comunque: costruire un toro, cioè una ciambella, partendo da un foglio di carta, è molto semplice: prima costruite un cilindro incollando due bordi opposti del foglio; poi incollate le due estremità del cilindro (figura 6.3).

Se veramente siete stati così zelanti da tentare di seguire le

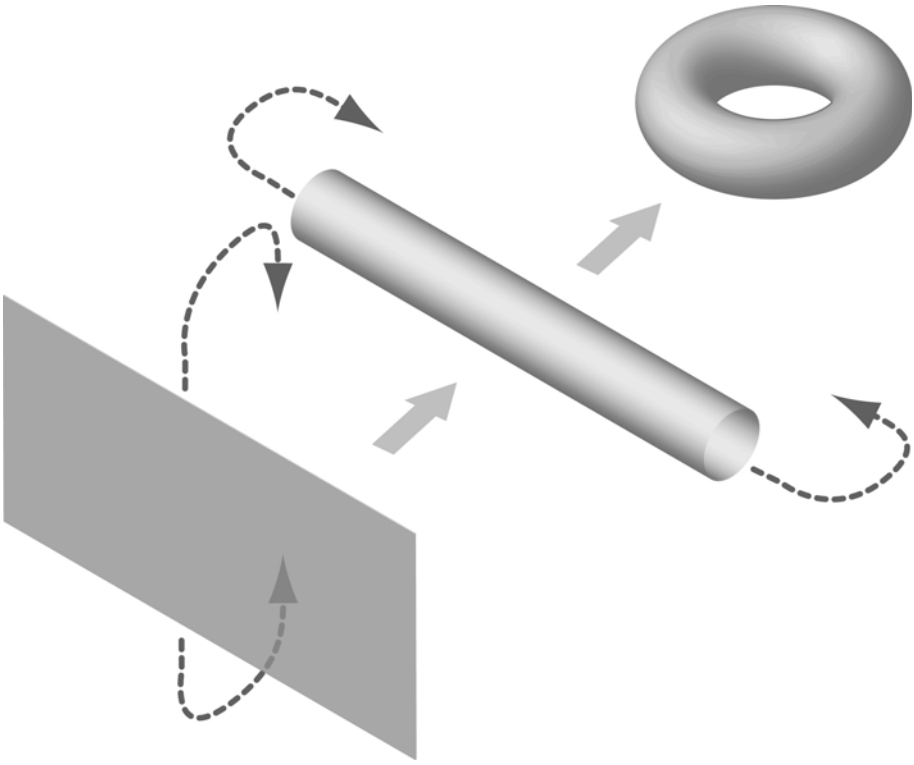


Figura 6.3: Si può costruire un toro (una ciambella) partendo da un foglio piano senza fare nessun taglio, ma solo incollando a due a due i lati opposti.

mie istruzioni, temo che la vostra ciambella sarà riuscita piuttosto male. In realtà, per un risultato ottimale il foglio di carta dovrebbe essere elastico, ma pazienza (lasciate perdere, non andate a procurarvi un foglio di gomma). La cosa importante, però, è questa: dal punto di vista della topologia, il vostro foglio di carta è equivalente alla ciambella, o toro che dir si voglia. Non avete dovuto fare né tagli né buchi per passare dall'uno all'altra. Quello che avete ottenuto, però, è diverso per un motivo molto importante: mentre il foglio di carta ha confini, la ciambella no. Se foste esseri bidimensionali potreste girare in lungo e in largo sulla superficie della vostra ciambella, senza incontrare mai un limite. D'altra parte, la superficie complessiva della ciambella è finita. Siete dunque giunti, partendo da una superficie piatta, a

una situazione molto simile a quella che avevamo visto per una sfera, che in due dimensioni descrive un Universo chiuso, cioè a curvatura positiva: una superficie finita ma senza confini.

La curvatura del toro, purtroppo, non è nulla. Una ciambella non ha una superficie piatta. Però potete costruire una ciambella piatta. Non sedendovici sopra, no. Il modo giusto di farlo sarebbe quello di seguire le istruzioni di prima, incollando prima due bordi opposti, poi gli altri due, ma stavolta senza curvare il foglio. Come possiamo farlo? Un modo c'è, e chiunque abbia mai giocato a uno di quei vecchi videogiochi in cui l'omino che usciva dal bordo superiore dello schermo rientrava dal bordo inferiore può aver intuito dove stiamo andando a parare. Per costruire un toro piatto, infatti, dobbiamo semplicemente stabilire una connessione tra i bordi opposti del foglio, imponendo che coincidano l'uno con l'altro. Lo spazio costruito in questo modo non ha confini: un essere bidimensionale che percorra il foglio, giunto a uno dei bordi, continua a camminare, riapparendo dal bordo opposto. Un altro modo di vedere questo tipo di costruzione è quello di immaginare uno spazio piatto e infinito ricoperto di infinite repliche di una figura di base finita, nel nostro caso un rettangolo: una specie di "piastrellatura" dello spazio.

Estendendo quello che abbiamo visto finora dalle due alle tre dimensioni, possiamo continuare a giocare con le possibilità offerte dalla topologia. L'idea è sempre quella di costruire spazi connessi facendo combaciare le facce di qualche figura geometrica solida. In questo modo giungiamo alla conclusione che il nostro Universo potrebbe essere una specie di cristallo, costruito da infinite repliche di uno stesso solido di base. Ad esempio, potrebbe essere un cubo in cui ogni faccia è identificata con la faccia opposta. Oppure, si potrebbe scegliere come figura di base, invece di un cubo, un solido più complesso. Ancora, si potrebbero identificare non le facce opposte, ma le facce adiacenti, e così via. Il punto fondamentale però è questo: un Universo del genere potrebbe essere finito pur avendo una curvatura nulla. I matematici hanno dimostrato che, usando solidi diversi e connettendone le facce, si possono costruire in tutto 17 tipi diversi di Universo piatto ma finito, che si aggiungono al tipo più semplice, un Universo piatto e infinito, senza connessioni. Universi di questo tipo vengono chiamati Universi a *topologia compatta*.

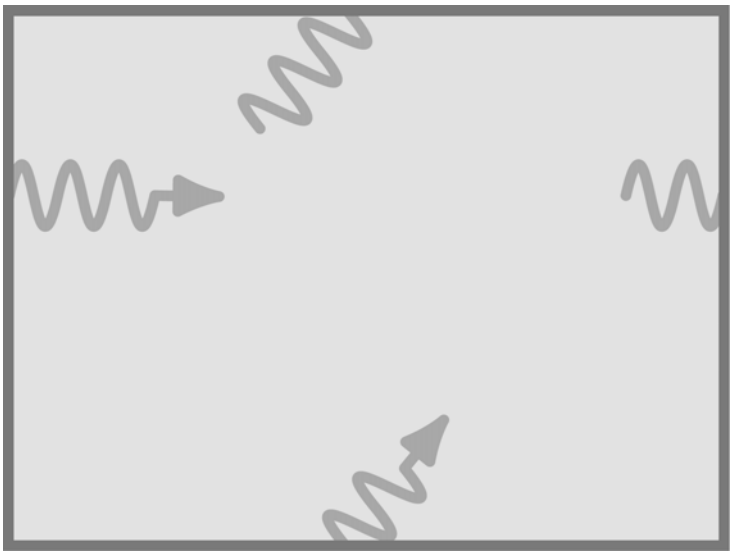


Figura 6.4: La topologia di una superficie piana in cui vengono identificati i due lati opposti è identica a quella di un toro. Un fotone che attraversi un bordo di questa superficie sbucherà dalla parte opposta. Un Universo di questo tipo sarebbe finito e piatto senza essere limitato. Ogni sorgente luminosa produrrebbe un numero infinito di immagini replicate di se stessa.

Vivere in un Universo a topologia compatta ha conseguenze bizzarre. Avendo identificato tra loro punti diversi dell'Universo, andiamo incontro a una conclusione inevitabile: proprio come l'omino del videogioco arrivato al bordo superiore dello schermo sbuca dal bordo inferiore, così un fotone che viaggi in linea retta in una data direzione dovrebbe a un certo punto attraversare la zona di connessione tra due elementi di base dello spazio e riapparire in un punto diverso (figura 6.4). Questo significa che un Universo del genere sarebbe popolato di immagini *fantasma*: per ogni oggetto "reale" di partenza, potremmo osservare infinite riproduzioni che si estendono in ogni direzione. L'Universo assomiglierebbe a un colossale gioco di specchi: e, proprio come quando ci si infila tra due specchi opposti, sarebbe teoricamente possibile vedere persino la propria stessa immagine replicata un numero infinito di volte!

Non solo, ma siccome la luce impiega un tempo finito ad at-

traversare l'Universo, le immagini multiple mostrerebbero l'oggetto di partenza, per esempio una galassia, in momenti diversi della propria evoluzione. Siamo quindi passati da un Universo infinito, disseminato di infinite repliche di noi stessi, a un Universo finito, anch'esso disseminato di repliche, ma solo all'apparenza reali.

La possibilità di osservare immagini fantasma ha portato alcuni cosmologi a proporre di usare proprio questo fatto come un metodo per stabilire se esistono connessioni tra diverse regioni dell'Universo, e quindi se questo è infinito o solo molto grande. Ovviamente, ciò è possibile soltanto se le regioni dell'Universo che sono in connessione si trovano all'interno dell'orizzonte. In altre parole, la luce emessa da un oggetto dovrebbe aver avuto abbastanza tempo per giungere dal punto di partenza fino al "limite" del solido di base, varcarlo, sbucare da un'altra parte dell'Universo, e finalmente giungere di nuovo fino a noi. In caso contrario, non potremmo vedere alcuna immagine multipla e non ci sarebbe modo di accertare la presenza di connessioni.

La ricerca di immagini multiple dello stesso oggetto celeste è complicata dal fatto di doverlo identificare osservandolo in stadi diversi della sua evoluzione. Teoricamente, potremmo aver già osservato la Via Lattea da giovane, e non averla riconosciuta! Finora, comunque, questo tipo di ricerche non ha dato alcun esito.

Molti cosmologi ritengono che sia l'osservazione della radiazione cosmica di fondo il modo più promettente di cercare evidenze di un Universo a topologia compatta. Infatti, la superficie sferica da cui sono partiti i fotoni del fondo cosmico segna il confine di quello che possiamo osservare nell'Universo: questo permette di spingere la ricerca di immagini multiple fino alla massima distanza possibile. Uno dei metodi proposti sfrutta il fatto che, se l'Universo fosse finito e il suo limite cadesse all'interno della regione sferica da cui sono partiti i fotoni del fondo cosmico, dovremmo vedere repliche delle stesse fluttuazioni di temperatura lungo coppie di cerchi sul cielo. Queste coppie di cerchi sarebbero i punti dove la sfera attraversa il limite del solido di base, ovvero le zone di connessione dell'Universo.

Un altro metodo è quello di cercare "frequenze mancanti" nello spettro delle anisotropie del fondo cosmico. Proprio come

le note emesse da una campana non possono avere lunghezze d'onda maggiori della dimensione della campana stessa, così il plasma primordiale non avrebbe potuto vibrare a frequenze più basse di una certa soglia se l'Universo fosse finito. Al "timbro" dell'Universo verrebbero a mancare i toni più gravi e lo spettro delle fluttuazioni dovrebbe quindi mostrare una diminuzione di potenza alle frequenze più basse.

Proprio usando quest'ultimo metodo, alcuni ricercatori hanno affermato, in un articolo pubblicato nel 2003 sulla rivista *Nature*, di aver trovato l'evidenza di un Universo a topologia compatta analizzando lo spettro misurato da WMAP. Il solido di base, secondo questo studio, sarebbe un dodecaedro: l'Universo avrebbe cioè la forma di un pallone da calcio! I limiti sulla curvatura dell'Universo (e quindi sulla sua densità) trovati da WMAP, permetterebbero inoltre di stabilire la dimensione del solido di base: il dodecaedro avrebbe un volume circa il 20% più piccolo dell'Universo osservabile. Bisogna aggiungere che questi risultati sono ancora oggetto di controversie. Pochi mesi dopo, un articolo pubblicato su *Physical Review Letters* contestava queste conclusioni usando il metodo delle coppie di cerchi nel cielo, e poneva un limite diverso alla dimensione minima dell'Universo: ci sarebbe ancora margine per un Universo più piccolo dell'orizzonte, ma non di molto.

È innegabile che lo spettro dei dati di WMAP alle frequenze più basse mostri meno potenza di quello che ci si aspetterebbe teoricamente da un modello che sia in accordo con la forma dei picchi acustici. Questo fatto ha stimolato molte diverse interpretazioni, oltre a quella della topologia compatta dell'Universo. La diminuzione potrebbe essere dovuta semplicemente a errori di osservazione, oppure potrebbe portare a rivedere il principio cosmologico di omogeneità e isotropia, introducendo ad esempio lievi differenze nel modo in cui l'Universo si espande in diverse direzioni. È ancora presto per dare una risposta definitiva a questo problema. Di certo, l'investigazione prosegue. In un futuro molto prossimo, ulteriori e più accurate osservazioni delle anisotropie della radiazione di fondo, quali quelle del satellite Planck, oltre a rendere incredibilmente più precisa la misura della curvatura dell'Universo, potrebbero portarci un po' più vicini alla soluzione di uno dei quesiti più antichi e affascinanti che l'uomo

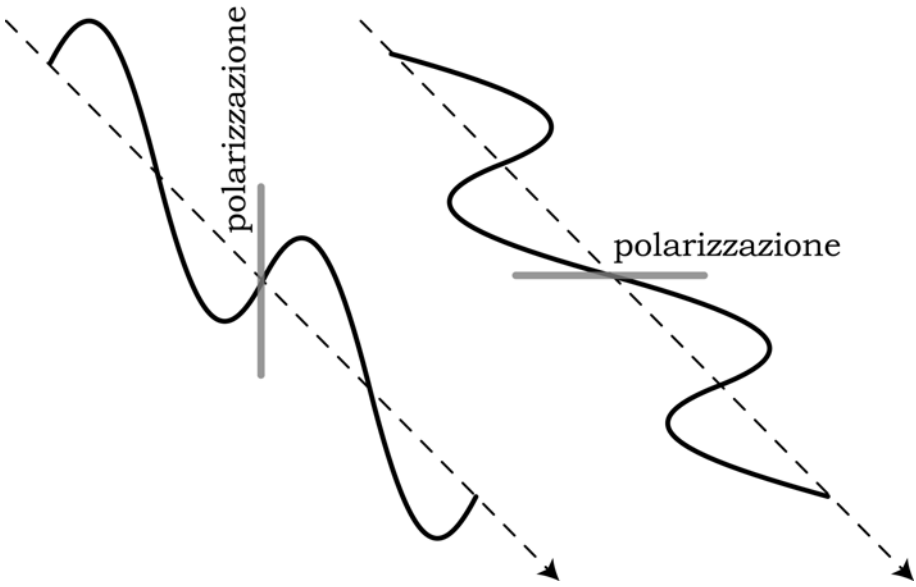



Figura 6.5: Due onde elettromagnetiche che si propagano nella stessa direzione, con polarizzazione orientata lungo assi perpendicolari fra loro.

abbia dovuto affrontare: il Cosmo è infinito, o è soltanto molto grande?

## Una nuova frontiera

Quando nel capitolo 2 abbiamo parlato dei fotoni come dei mattoni fondamentali della luce e abbiamo detto che il loro comportamento può sempre essere equiparato anche a quello di un'onda, abbiamo tralasciato un aspetto piuttosto importante. L'onda associata a ogni singolo fotone oscilla lungo una particolare orientazione su un piano perpendicolare alla direzione di propagazione (figura 6.5). Normalmente, la luce è composta da un numero enorme di fotoni, ognuno con l'oscillazione orientata in modo diverso e completamente casuale.

Talvolta però, a seguito di qualche meccanismo fisico, tutti i fotoni finiscono per allineare la loro oscillazione lungo una stessa direzione. In tal caso, si dice che il fascio luminoso è *po-*

*larizzato*. Questo avviene, ad esempio, quando la luce del Sole attraversa l'atmosfera terrestre: la conseguenza è che una frazione della luce diurna è polarizzata. Su questo fatto si basano le lenti di alcuni occhiali da sole, che attenuano l'intensità luminosa facendo passare solo le onde polarizzate in una certa direzione.

Nel 1968, l'astronomo Martin Rees notò per primo che una cosa del genere doveva succedere anche a una parte dei fotoni della radiazione cosmica di fondo quando essi si disaccoppiavano dalla materia. La frazione di radiazione polarizzata, secondo i calcoli dettagliati eseguiti dai cosmologi negli ultimi decenni, dovrebbe essere piccola, circa il 10% del totale. La sua osservazione, però, può avere una grande importanza dal punto di vista cosmologico. La teoria della polarizzazione della radiazione cosmica di fondo è piuttosto complessa, e una sua descrizione è fuori dalla portata di questo libro. Possiamo comunque tentare di dare qualche idea di quello che i cosmologi sperano di poter ricavare dal suo studio.

Abbiamo visto che nel plasma primordiale gli elettroni liberi si trovano immersi in un mare di fotoni che li urtano incessantemente e vengono diffusi in tutte le direzioni. La radiazione diffusa da ogni elettrone è polarizzata solo quando si verifica una condizione ben precisa: l'energia dei fotoni che colpiscono l'elettrone non è la stessa da tutte le direzioni, ma segue la forma di un *quadrupolo* (figura 6.6). Come dice il nome, il quadrupolo è un oggetto che ha quattro poli, i quali formano un angolo di 90° tra loro, un po' come i quattro punti cardinali su una bussola. Ecco, se la radiazione che giunge su un elettrone da nord e da sud è più calda di quella che giunge da est e da ovest, i fotoni diffusi si ritrovano tutti polarizzati lungo l'asse nord-sud (ovviamente qui la definizione di nord e sud è completamente arbitraria e serve solo a fissare le idee).

È chiaro quindi che, siccome solo una parte della radiazione che giunge sull'elettrone avrà le caratteristiche richieste, la frazione di radiazione polarizzata sarà molto piccola. È inoltre evidente che questo meccanismo potrà essere attivo solo quando l'Universo sta per diventare trasparente. Infatti, per poter giungere su ogni elettrone con energie diverse da direzioni diverse i fotoni devono poter viaggiare con facilità da regioni più den-

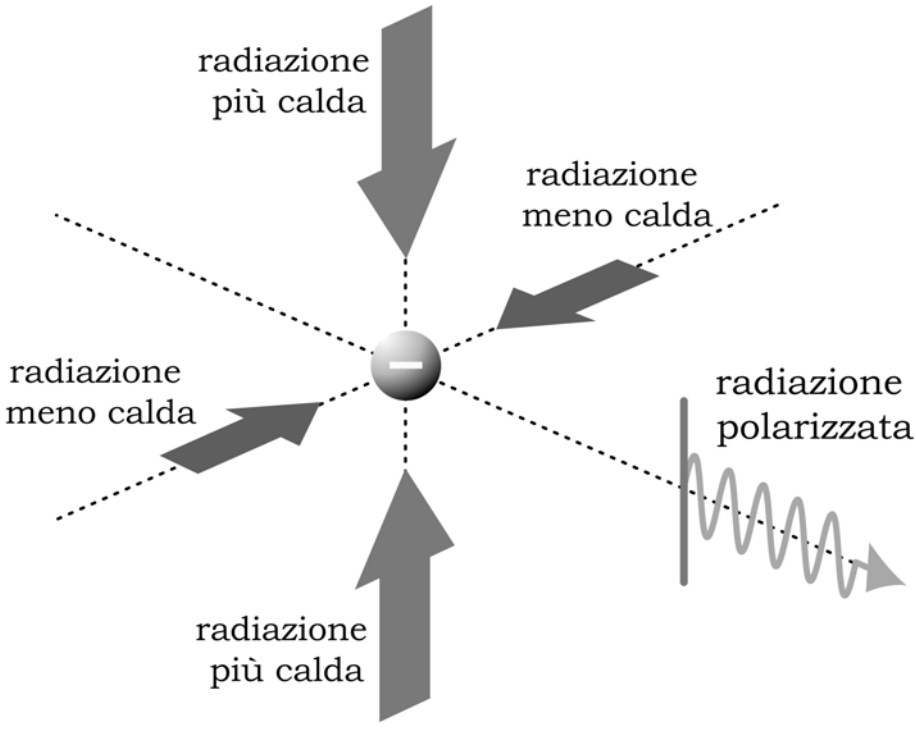



Figura 6.6: Il meccanismo attraverso il quale la radiazione cosmica di fondo può acquistare una polarizzazione particolare al momento del disaccoppiamento dipende dalla presenza di un'anisotropia di quadrupolo nella radiazione che colpisce l'elettrone: la radiazione proveniente lungo un certo asse deve essere più calda (fotoni più energetici) rispetto a quella che proviene dalle direzioni perpendicolari. In questo caso, i fotoni diffusi hanno tutti polarizzazione allineata lungo l'asse da cui proviene la radiazione più calda.

se a regioni meno dense del plasma, cosa che non è possibile quando materia e radiazione sono legate strettamente. La radiazione primordiale può allora diventare polarizzata soltanto nelle fasi immediatamente precedenti al disaccoppiamento. Questo fatto è molto importante, perché permette di ricostruire separatamente quello che avviene nell'Universo durante la formazione degli atomi da quello che ha avuto luogo durante tutto il periodo precedente.

Il modo in cui la radiazione si polarizza è inoltre fortemente

legato alla presenza di oscillazioni acustiche nel plasma primordiale. Un interessante risultato degli studi teorici è che, se si potesse ottenere dalle osservazioni uno spettro dell'intensità del segnale polarizzato (analogo a quello misurato per le fluttuazioni di temperatura) si dovrebbero trovare ancora picchi e valli, ma con un preciso sfasamento in frequenza. Alle frequenze dove cadono i picchi acustici nello spettro delle anisotropie, dovrebbero corrispondere valli nello spettro della componente polarizzata, e viceversa. Qualora questo fatto venisse un giorno davvero provato dalle osservazioni, sarebbe un'ulteriore straordinaria conferma della presenza di onde sonore nel plasma primordiale e della correttezza delle teorie inflazionarie.

Ma lo studio della polarizzazione potrebbe permettere indirettamente di investigare anche la fisica delle fasi più remote dell'evoluzione cosmica. La teoria della gravitazione di Einstein prevede l'esistenza di elusive *onde gravitazionali*, analoghe alle onde che vengono associate ai fenomeni elettromagnetici. Le onde gravitazionali sarebbero increspature dello spaziotempo, ondulazioni della curvatura provocate da repentine variazioni del campo gravitazionale. Si pensa che queste onde debbano essere in generale molto tenui, a causa della ben nota debolezza della forza gravitazionale rispetto a quella delle altre forze. L'unica speranza di rivelare l'esistenza di onde gravitazionali, data la tecnologia attuale, è di osservarle in associazione con fenomeni estremi, come l'esplosione di una supernova, in cui masse immense vengono messe in movimento in tempi brevissimi e su scale enormi. Finora, tuttavia, non sono state raccolte prove dirette dell'esistenza di queste onde.

Secondo gli studi teorici, onde gravitazionali molto deboli potrebbero essere state prodotte nell'Universo anche durante l'inflazione. Queste avrebbero avuto l'effetto di alterare la curvatura dello spazio proprio come le perturbazioni di densità primordiali, ed è quindi lecito aspettarsi che la radiazione di fondo conservi qualche segno della loro presenza. Purtroppo, però, osservando soltanto le variazioni di temperatura dei fotoni, non è molto facile distinguere la traccia lasciata dalle onde gravitazionali primordiali da quella causata da normali perturbazioni di densità. Se però si tiene conto anche della polarizzazione, le cose si fanno interessanti. I calcoli mostrano, infatti, che l'orienta-

mento medio della polarizzazione dovrebbe avere caratteristiche completamente diverse se le perturbazioni nella curvatura sono state provocate da onde gravitazionali primordiali o se esse sono state invece causate da semplici addensamenti di materia. Se si potesse ottenere in questo modo una conferma della presenza di onde gravitazionali primordiali, e una misura della loro intensità, si avrebbe un'ennesima verifica sperimentale dei modelli di inflazione, e un risultato rivoluzionario per la fisica in generale.

La polarizzazione della radiazione di fondo ha anche un'altra importante applicazione. Abbiamo fin qui sempre ipotizzato che l'Universo sia diventato trasparente al momento della ricombinazione, e sia rimasto tale fino a oggi. Si sa piuttosto bene, in realtà, che ciò è vero solo approssimativamente. In tempi successivi, infatti, l'Universo si è di nuovo riempito di elettroni liberi. Questo è avvenuto quando le prime stelle e galassie hanno cominciato a formarsi, diverse centinaia di milioni di anni dopo il Big Bang. I processi che hanno portato all'addensarsi della materia nelle strutture cosmiche, e all'accensione delle prime stelle e galassie, hanno comportato un forte rilascio di energia: questa energia ha fatto balzare via gli elettroni dagli atomi di idrogeno sparsi nell'Universo. Gli astrofisici chiamano questo processo *reionizzazione*.

Stabilire con precisione quando e come ha avuto luogo la formazione delle prime strutture cosmiche è una sfida molto importante che la cosmologia sta appena iniziando a raccogliere. Non si sa molto, infatti, di quella sorta di "medioevo cosmico" che ha preceduto la comparsa delle prime galassie: un'*epoca oscura*, di cui abbiamo scarse notizie, semplicemente perché nell'Universo non c'erano ancora oggetti che emettessero in abbondanza qualche forma di segnale elettromagnetico. Lo studio del fondo cosmico potrebbe rivelarsi ancora una volta prezioso. Alcuni fotoni della radiazione primordiale, infatti, nel loro lungo tragitto per giungere fino a noi, potrebbero aver urtato gli elettroni liberati nell'Universo durante la reionizzazione. Questa seconda diffusione dei fotoni avrebbe l'effetto di "sfocare" leggermente le macchie della radiazione di fondo, attenuando leggermente l'intensità dei picchi nello spettro. Misurando questa diminuzione di intensità si potrebbe tentare di capire quando ha avuto luogo la reionizzazione. Inoltre, nell'urto con gli elettroni, i fotoni

verrebbero nuovamente polarizzati, in un modo che lascerebbe un segno caratteristico e inconfondibile. Dall'osservazione della polarizzazione del fondo cosmico, dunque, si potrebbe determinare con maggiore sicurezza l'epoca della reionizzazione e forse anche alcuni dei dettagli del modo in cui essa è avvenuta.

L'osservazione della polarizzazione del fondo cosmico si trova oggi nello stesso stato pionieristico in cui si trovava la ricerca delle anisotropie venti anni fa. I dati sono pochi e frammentari, e le difficoltà tecniche da superare enormi, anche a causa dell'estrema debolezza del segnale polarizzato. L'esperimento DASI, nel 2001, ha annunciato di aver trovato la prima evidenza di un segnale polarizzato nel fondo cosmico, più o meno al livello previsto dalla teoria. Attualmente, i dati migliori sono quelli raccolti dall'esperimento BOOMERANG nel corso di nuove osservazioni effettuate nel 2003, e quelli del satellite WMAP. Questi risultati, per quanto incoraggianti, sono ancora affetti da incertezze ragguardevoli, e aspettano ulteriori conferme nel prossimo futuro da Planck e da numerosi altri esperimenti specifici che sono attualmente in fase di progettazione.

È chiaro comunque che lo studio della polarizzazione della radiazione cosmica di fondo ha un potenziale enorme per la cosmologia, paragonabile a quello racchiuso nelle fluttuazioni di temperatura. Questa è, indubbiamente, la nuova frontiera osservativa, il Far West verso cui si sta oggi dirigendo la grande carovana dei ricercatori.

## Verso l'inizio

Come abbiamo già detto nel capitolo 1, il modello cosmologico del Big Bang riesce a descrivere egregiamente lo stato dell'Universo a partire da una frazione di tempo minuscola dopo l'istante iniziale. C'è evidenza sperimentale molto forte che il quadro delineato dal modello del Big Bang sia corretto a partire da pochi centesimi di secondo dopo l'inizio, evidenza che deriva dalla corretta previsione delle abbondanze degli elementi leggeri fornita dal meccanismo di nucleosintesi primordiale. Come abbiamo visto, le previsioni della nucleosintesi hanno avuto un'ulteriore e indipendente conferma dall'analisi dello spettro delle anisotro-

pie della radiazione cosmica di fondo, mostrando quindi che il modello del Big Bang è abbastanza robusto da poter fornire una descrizione coerente dell'Universo in fasi estremamente diverse della sua evoluzione.

Quando si cerca di usare il modello del Big Bang per estrapolare il comportamento dell'Universo a tempi precendenti, tuttavia, le cose si fanno sempre più incerte, e le previsioni sempre più difficili da verificare. La nostra conoscenza della fisica fondamentale diventa sempre più lacunosa man mano che ci si avvicina all'istante iniziale, a causa del fatto che le dimensioni dell'Universo diventano sempre più piccole, e le energie in gioco sempre più grandi.

Ci sono forti motivazioni per ritenere che le quattro forze che governano le interazioni del mondo fisico (gravitazionale, elettromagnetica, nucleare debole e forte) siano in realtà manifestazioni di un'unica interazione fondamentale, e che esse ci appaiano distinte solo a causa della bassa energia che contraddistingue la fase attuale dell'evoluzione dell'Universo. Se le osservassimo a energie molto maggiori, le quattro diverse interazioni ci apparirebbero "mescolarsi" in un'entità unica, come differenti metalli che si fondono insieme in un crogiolo.

Ad alte energie, la forza elettromagnetica e la forza debole possono in effetti essere descritte da un modello unificato, il *modello elettrodebole*, proposto da Sheldon Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg nel 1979. La correttezza di questo modello è un fatto sperimentalmente accertato, che è valso il premio Nobel ai tre scopritori. L'unificazione elettrodebole avviene a energie corrispondenti a quelle che dovevano esistere nell'Universo quando erano trascorsi appena $10^{-12}$ secondi (un milionesimo di milionesimo di secondo) dall'inizio. Fino a questa epoca così remota, la nostra comprensione dei meccanismi fisici che devono essere avvenuti nell'Universo poggia su basi molto solide.

Esiste un quadro teorico abbastanza ben definito che mostra che anche la forza nucleare forte si "mescola" con la forza elettrodebole a energie ancora maggiori, pari a quelle che dovevano esistere nell'Universo a un tempo incredibilmente piccolo dopo l'inizio: $10^{-39}$ secondi. Le tecnologie attuali non hanno ancora permesso di verificare direttamente le previsioni di queste *teorie di grande unificazione*, proposte inizialmente da Glashow e da

Howard Georgi, e raffinate in seguito da questi insieme a Weinberg e a Helen Quinn. Tuttavia, c'è consenso sul fatto che i pezzi fondamentali della teoria siano al posto giusto, e che la verifica sperimentale non dovrebbe essere molto lontana. Più o meno intorno all'epoca della grande unificazione, l'Universo deve avere attraversato la fase inflazionaria. Come abbiamo già osservato, non esiste un modello univoco per realizzare l'inflazione, sebbene rimangano oggi pochi dubbi sul fatto che un meccanismo con queste caratteristiche abbia avuto luogo nell'Universo primordiale.

Quello che sappiamo sulla fisica delle interazioni fondamentali ci costringe a fermarci qui. Se proviamo a spingerci a tempi ancora precedenti, usando il modello del Big Bang, siamo costretti a varcare territori ignoti, dove nessuna delle teorie oggi conosciute è in grado di dare risposte certe. Il modello del Big Bang, preso alla lettera, ci costringe a immaginare un mondo in cui tutto quello che costituisce l'Universo attuale viene compresso in un punto matematico, privo di dimensioni. Un mondo in cui l'energia, la densità, la temperatura, crescono inesorabilmente fino a raggiungere un valore letteralmente infinito. Nessuna teoria fisica nota può descrivere un simile stato. In realtà, la presenza stessa degli infiniti è un indizio sicuro che il modello fisico usato diventa completamente inadeguato per descrivere l'approssimarsi all'istante iniziale. Il raggiungimento di quello che i fisici chiamano una *singolarità*, ossia l'apparire di valori infiniti, è il modo in cui il modello ammette il suo fallimento.

Il motivo di questo fallimento è abbastanza semplice da comprendere. Quando abbiamo illustrato per la prima volta il modello del Big Bang, abbiamo ricordato che esso è essenzialmente derivato dalle equazioni della relatività generale, che, come abbiamo detto, è una teoria della gravitazione. Il modello del Big Bang assume che il contenuto dell'Universo, attraverso i suoi effetti gravitazionali, influenzi l'evoluzione complessiva dello spaziotempo. Nel fare questo, abbiamo supposto che le altre interazioni fondamentali non giochino alcun ruolo: esse sono responsabili delle mutue relazioni tra i costituenti dell'Universo su scale piccole, in particolare sulle scale microscopiche che sono associate ai fenomeni atomici e subatomici, ma non contribuiscono all'evoluzione dell'Universo sulle scale più grandi,

confrontabili con le dimensioni stesse del Cosmo. In altre parole, è la gravità che stabilisce la cornice complessiva, il palcoscenico su cui avvengono i fenomeni fisici, e solo all'interno di questo quadro generale entrano in gioco le altre interazioni fondamentali.

L'importanza delle tre interazioni non gravitazionali su scale microscopiche, al contrario, è talmente grande, che la situazione si ribalta. Nei fenomeni che avvengono su scale atomiche, la gravità, come abbiamo visto, è totalmente irrilevante, mentre le altre interazioni assumono un'importanza enorme. A queste scale, entriamo nel mondo della meccanica quantistica, e la relatività generale è uno strumento fondamentalmente superfluo. In pratica, nella stragrande maggioranza dei problemi fisici le due teorie più importanti della fisica moderna, la relatività generale e la meccanica quantistica, vivono in due domini completamente separati, e non hanno ragioni per pestarsi i piedi a vicenda. Gli studiosi dell'Universo su grande scala si disinteressano degli effetti quantistici, mentre i fisici che si occupano del mondo microscopico fanno tranquillamente a meno della relatività generale.

Purtroppo, però, il modello del Big Bang ci costringe ad abbandonare questo abito mentale. Quando ci spingiamo a epoche sempre più vicine all'istante iniziale, siamo costretti a considerare un intero Universo racchiuso dentro dimensioni molto più piccole di quelle di un atomo. La meccanica quantistica inizia così a reclamare a gran voce il suo ruolo nella commedia. E a questo punto le cose cominciano a farsi davvero complicate.

Incorporare le tre interazioni non gravitazionali nel formalismo della meccanica quantistica si è rivelato, nel corso del XX secolo, un compito arduo, ma che ha avuto alla fine un esito felice. Le cosiddette *teorie di campo quantistiche* descrivono la forza elettromagnetica e le forze nucleari forte e debole usando il formalismo della meccanica quantistica, consentendo, perciò, di entrare agevolmente nel regno del mondo atomico e subatomico. È proprio nell'ambito di queste teorie, inoltre, che si è giunti, pur tra molte difficoltà, a unificare il comportamento delle tre interazioni alle alte energie.

Il cammino verso il compimento di un'impresa di questo tipo per l'interazione gravitazionale si è rivelato, invece, disseminato

di ostacoli insormontabili. Incorporare la meccanica quantistica nella relatività generale, ovvero tentare di produrre una teoria quantistica della gravitazione, è stato un processo finora infruttuoso. Allo stesso modo, il tentativo di unificare l'interazione gravitazionale con le altre forze fondamentali non ha raggiunto alcun risultato. Questo ha come conseguenza l'impossibilità di descrivere lo stato dell'Universo quando dobbiamo tenere conto contemporaneamente della meccanica quantistica e della relatività generale. In poche parole, la fisica nota e verificata cessa di valere quando ci avviciniamo troppo all'istante iniziale.

Il momento dell'evoluzione cosmica in cui la nostra costruzione teorica crolla miseramente in frantumi è quello intorno al quale l'Universo ha dimensioni dell'ordine di un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di centimetro ($10^{-33}$ cm). Il nostro film a ritroso dell'espansione deve, date le nostre conoscenze attuali, terminare qui. Secondo il modello del Big Bang, sono passati in quel momento circa $10^{-43}$ secondi dall'istante iniziale: una frazione di tempo che va al di là delle umane capacità di immaginazione. I fisici chiamano questo istante minuscolo *tempo di Planck* e la dimensione caratteristica dell'Universo a quell'epoca *lunghezza di Planck*.

Ci si potrebbe chiedere se davvero valga la pena di investigare quello che avviene in un intervallo di tempo così incredibilmente piccolo come quello intercorso fino al tempo di Planck. In realtà, l'idea di tempo in un Universo in espansione è estremamente diversa da quella della nostra esperienza ordinaria, soprattutto quando ci si avvicina all'istante iniziale. Man mano che si procede a ritroso nel tempo accadono sempre più cose in periodi sempre più brevi. Le fasi iniziali dell'Universo sono sede di eventi estremi e interessantissimi, e una feconda fucina di idee per gli studiosi della fisica fondamentale.

In particolare, negli ultimi venti anni le frontiere della fisica teorica si sono spinte sempre più avanti, tentando di trovare una soluzione al problema dell'unificazione delle quattro interazioni fondamentali e del conflitto tra meccanica quantistica e relatività generale. Si è fatta sempre più strada la convinzione che l'adozione di un particolare tipo di formalismo, che rientra nell'ambito della cosiddetta *teoria delle stringhe*, sia in grado di trattare proprio quel tipo di situazione fisica che doveva essere

presente nell'Universo prima del tempo di Planck.

Una trattazione della teoria delle stringhe esula dagli scopi di questo libro. L'idea fondamentale è che, al livello più elementare, la materia non sia costituita da particelle elementari puntiformi, ma da *stringhe*: minuscoli anelli unidimensionali che vibrano come corde di uno strumento musicale, intonate intorno a una frequenza fondamentale. I diversi modi di vibrazione, le armoniche della stringa, rappresenterebbero i diversi stati fisici associati alle particelle elementari che conosciamo, ovvero la loro massa, carica, ecc. C'è un solo tipo fondamentale di stringa, che attraverso le sue oscillazioni, attraverso le "note" che suona, dà vita alla fioritura di particelle elementari che compongono il nostro Universo. È singolare notare come anche le ultime idee della fisica teorica ci conducano a usare analogie musicali per spiegare le proprietà più elementari dell'Universo. In realtà, lo spaziotempo stesso potrebbe essere descritto da una sottilissima trama costituita da un enorme numero di stringhe che vibrano in modo coerente.

Un ingrediente fondamentale della teoria delle stringhe è che le tre dimensioni spaziali che conosciamo (quelle che servono a identificare la nostra posizione in un punto qualsiasi dell'Universo, e a cui familiarmente ci riferiamo con altezza, lunghezza e larghezza) potrebbero non essere le uniche. Per funzionare, la teoria delle stringhe ha bisogno di ulteriori dimensioni, o *dimensioni extra*, di cui non abbiamo esperienza nel mondo ordinario. La ragione dell'elusività delle dimensioni extra starebbe nel fatto che esse sarebbero *compattificate*, ovvero arrotolate su loro stesse in modo da formare una specie di gomitolo talmente piccolo da collocarsi al di fuori della possibilità di investigazione persino degli strumenti più sofisticati. Dal momento che le misure che siamo attualmente in grado di compiere non ci permettono di spingerci al di sotto di un miliardesimo di miliardesimo di metro, qualsiasi dimensione extra che fosse compattificata su scale più piccole ci sarebbe inaccessibile.

Allo stesso modo in cui, non potendo percepire lo spessore di un capello con le dita, siamo portati a considerarlo ai fini pratici come un filo unidimensionale (sebbene un microscopio ce lo riveli come dotato di uno spessore, e più simile a un tubo), così il nostro mondo ci apparirebbe dunque avere soltanto

tre dimensioni, le uniche di cui abbiamo esperienza ordinaria. Secondo alcune versioni della teoria delle stringhe dovrebbero esistere invece complessivamente dieci dimensioni spaziali, per cui il nostro Universo sarebbe descritto da uno spaziotempo a undici dimensioni. Soltanto tre dimensioni avrebbero subito l'espansione descritta dal modello del Big Bang, mentre le altre sarebbero rimaste ristrette a dimensioni minuscole. L'esatta struttura delle dimensioni extra sarebbe però responsabile delle peculiarità dei modi di vibrazione delle stringhe (e quindi delle caratteristiche delle particelle elementari) e avrebbe quindi effetti che potrebbero indirettamente essere accessibili alle misurazioni fisiche.

Quali sarebbero le conseguenze della teoria delle stringhe per il modello del Big Bang a tempi precedenti al tempo di Planck? L'incorporazione della teoria delle stringhe all'interno del modello cosmologico sta appena muovendo i primi incerti passi, e i risultati ottenuti sono tutti ancora da precisare. I calcoli eseguiti in condizioni così estreme sono estremamente ardui, e considerati per certi versi inattendibili dagli stessi esperti del campo.

Una delle conseguenze della teoria delle stringhe sembrerebbe essere che l'Universo non può aver avuto dimensioni inferiori a una certa scala (corrispondente all'incirca alla lunghezza di Planck) in alcuna fase della sua evoluzione. Non ci sarebbero singolarità iniziali: gli infiniti sarebbero banditi, per il fatto stesso che l'Universo non sarebbe mai stato un punto privo di dimensioni. Un risultato piuttosto intrigante sarebbe che, dal punto di vista matematico, un Universo che stesse contraendosi a dimensioni inferiori alla lunghezza di Planck apparirebbe perfettamente identico a un Universo che stesse espandendosi a dimensioni maggiori della stessa lunghezza. In altre parole, qualsiasi tentativo di contrarre un Universo al di sotto della lunghezza di Planck si tramuterebbe di fatto in un'espansione. Stando a questa descrizione, quindi, il nostro stesso Universo potrebbe aver avuto origine da una specie di rimbalzo (o *bounce*, per usare il termine inglese adottato dai cosmologi) successivo a una precedente contrazione (ricordiamo che, affinché l'Universo termini i suoi giorni in un gigantesco collasso, si richiede che la sua densità di materia sia maggiore del valore critico).

Alcuni calcoli, sebbene ancora basati su ipotesi molto speculative, darebbero inoltre conto della ragione per cui solo tre dimensioni spaziali, e non un numero diverso, si siano potute espandere fino a scale macroscopiche. Le tre dimensioni spaziali ordinarie potrebbero, esattamente come le dimensioni extra, essere a loro volta compattificate e di estensione finita, per esempio avere una struttura circolare. Il raggio di queste circonferenze potrebbe però essere così enorme da essere al di fuori dell'orizzonte: in questo modo noi non potremmo accorgerci del loro incurvarsi. Questo fatto aprirebbe una possibile interessante connessione con l'idea di Universo con topologia compatta descritta in precedenza.

È bene sottolineare che la teoria delle stringhe è ancora un'opera in divenire, che non ha raggiunto lo stato di una costruzione completamente definita e universalmente accettata. Sta faticosamente tentando di inquadrare una serie di fenomeni, finora scollegati e intrattabili, nell'ambito di un quadro complessivo estremamente elegante che ha raggiunto, negli ultimi anni, una quantità tale di successi teorici da convincere un sempre maggior numero di studiosi che la strada intrapresa potrebbe essere quella giusta. Il lavoro da fare è ancora enorme, ma potrebbe portare alla comprensione dei fondamenti ultimi del mondo fisico e, allo stesso tempo, gettare luce sui misteriosi attimi iniziali dell'Universo. Le energie necessarie a sottoporre a verifica sperimentale le previsioni della teoria delle stringhe, d'altra parte, sono talmente alte da precludere completamente la strategia che si è rivelata vincente per la fisica fondamentale degli ultimi decenni del XX secolo, ovvero quella di usare acceleratori di particelle sempre più potenti. Si è stimato che, per arrivare a indagare il mondo delle stringhe e delle dimensioni extra, avremmo bisogno di un acceleratore grande quanto l'intero Universo! Una strada impossibile da percorrere.

Lo studio del Cosmo primordiale, grazie alle enormi energie naturalmente presenti negli istanti successivi al Big Bang, potrebbe essere allora l'unico modo per mettere alla prova le nuove idee della fisica teorica. Lo sfruttamento di questo gigantesco laboratorio naturale che l'Universo neonato ci mette a disposizione si è già rivelato utilissimo nei decenni scorsi: sarà uno strumento di indagine sempre più importante nel futuro.

È ancora prematuro affermare che la teoria delle stringhe porterà a fare previsioni che possano essere messe alla prova attraverso misure di tipo cosmologico, e in particolare attraverso lo studio delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo, sebbene esistano incoraggianti segnali al riguardo. È plausibile ad esempio che il meccanismo responsabile dell'inflazione verrà alla fine inquadrato nello stesso schema che porterà a descrivere l'unificazione delle forze fondamentali, e che il problema dell'energia del vuoto sia uno dei rompicapi che potrebbe essere risolto da una teoria fondamentale che riconcili meccanica quantistica e relatività generale. Certamente la cosmologia continuerà a fornire importanti spunti per la fisica fondamentale, e costituirà un banco di prova inevitabile per qualsiasi teoria ultima.

# Epilogo

*La vastità dei cieli sfida la mia immaginazione; attaccato a questa piccola giostra il mio occhio riesce a cogliere luce vecchia di un milione di anni. Vedo un grande schema, di cui sono parte [...] Qual è lo schema, quale il suo significato, il perché? Saperne qualcosa non distrugge il mistero, perché la realtà è tanto più meravigliosa di quanto potesse immaginare nessun artista del passato.*

Richard Feynman, *Sei pezzi facili*

Dopo decenni di dure ricerche teoriche e di enormi sforzi osservativi, la cosmologia sta entrando in una nuova era: un'era in cui, per la prima volta, i tasselli del *puzzle* che descrive l'Universo in cui viviamo cominciano a combaciare e a formare un'immagine coerente e dettagliata. I cosmologi hanno usato tanti modi per raggiungere questo obiettivo, scrutando con sofisticati apparati l'Universo nei suoi angoli più lontani come in quelli più vicini, osservando l'enorme quantità di oggetti diversi e meravigliosi che il Cosmo offre generosamente ai nostri sguardi, e creando maestose costruzioni teoriche per interpretare i segreti che a poco a poco la natura ci ha rivelato.

Questo libro ha trattato di uno dei modi più potenti e ingegnosi che i cosmologi hanno escogitato per comprendere l'Universo: l'osservazione del debole segnale proveniente dai primordi della creazione, il tenue bagliore lasciato dall'immensa luce che pervadeva il Cosmo primordiale. La lista delle conquiste realizzate negli ultimi quarant'anni grazie allo studio di questo antico segnale cosmico è impressionante: lo testimonia il fatto che, nel giro di poco meno di trent'anni, due diversi premi Nobel per la

fisica sono stati assegnati per scoperte riguardanti proprio la radiazione cosmica di fondo (nel 1978 a Penzias e Wilson, e nel 2006 a Mather e Smoot). L'esistenza stessa della radiazione cosmica di fondo è una delle più forti evidenze (forse, la più forte) che il modello del Big Bang è valido, e che l'Universo si è evoluto a partire da uno stato caldo, denso e quasi indifferenziato. La presenza di minuscole increspature nella luce primordiale ci ha permesso di mappare la distribuzione di materia nell'Universo delle origini, e ci ha mostrato che tutto quello che osserviamo oggi nel Cosmo si è plasmato da quei minuscoli semi cosmici in un processo grandioso durato miliardi di anni. In modo sorprendente, inoltre, l'osservazione della radiazione di fondo ha rivelato la presenza nel Cosmo primordiale di armonie non dissimili da quelle che gli antichi, nei loro miti, attribuivano alle sfere celesti. L'analisi di questi suoni, di queste partiture fossili, ci ha permesso di capire meglio la natura fisica del nostro Universo, la sua composizione e la sua geometria.

Spero di essere riuscito a trasmettere, almeno in parte, la bellezza e la meraviglia che il libro della natura ci comunica attraverso il linguaggio matematico in cui è scritto, il senso delle ricerche di tante donne e uomini che hanno dedicato la loro vita allo studio del Cosmo, e le nuove conoscenze che queste hanno portato a tutti noi. Non possiamo sapere quante di queste conoscenze dovranno, negli anni a venire, essere aggiornate o viste sotto una nuova prospettiva in seguito a nuove scoperte. Ma non possiamo non commuoverci di fronte ai tentativi di capirci qualcosa compiuti da questa specie sperduta su un piccolo pianeta, in orbita intorno a una comunissima stella di una comunissima galassia e fatta (ora sappiamo) di una sostanza diversa dalla maggior parte del Cosmo in cui vive.

Forse proprio per questo dovremmo imparare a considerare noi stessi con lo stesso riguardo che riserviamo alle pietre preziose e ai metalli rari, con la stessa premurosa attenzione con cui trattiamo qualcosa di fragile e precario. Forse dovremmo essere più consapevoli del fatto che noi siamo, fino a prova contraria, gli unici osservatori coscienti di questo Universo, i soli a provare lo stupore di scoprirlo ordinato. Forse, nonostante la nostra apparente marginalità, siamo davvero al centro del Cosmo, in un modo molto più profondo di quanto abbiamo mai pensato.

# Ringraziamenti

Innanzitutto, un immenso grazie per il lavoro profuso nella realizzazione di questo libro a Marina Forlizzi della Springer, che è stata la prima a crederci, e a Corrado Lamberti, per i preziosi suggerimenti. Ho inoltre un particolare debito di gratitudine nei confronti di Margherita Hack, che ha scritto la prefazione.

Poi, grazie a Nicola Vittorio, per avermi introdotto (ormai quasi quindici anni fa) alla ricerca in cosmologia. La maggior parte delle opportunità di crescita che ho avuto in questo mestiere è merito suo, e gliene sono enormemente grato.

Grazie ai miei insegnanti, e ai tanti colleghi con cui ho collaborato nel corso degli anni. A ognuno sono debitore di una parte di quello che so. In particolare, grazie a George Smoot per quello che ho imparato lavorando al suo fianco per un paio di anni a Berkeley.

Un pensiero per gli amici, vecchi e nuovi, del gruppo di cosmologia dell'Università di Roma Tor Vergata, con cui condivido quotidianamente non solo le fatiche e le soddisfazioni della scienza, ma anche tanti momenti non strettamente professionali (forse, i migliori): Marco Bruni, Paolo Cabella, Giancarlo de Gasperis, Grazia De Troia, Domenico Marinucci, Pasquale Mazzotta, Paolo Natoli, Daniele Pagano, Davide Pietrobon, Claudia Quercellini, Alessio Traficante.

Infine, un grazie affettuoso ai miei genitori, per tutto quello che mi hanno insegnato, e ad Andrea e Alessio, senza nessuna ragione particolare.

A Ilaria: un grazie grande come l'Universo.

# INDICE ANALITICO


acceleratori di particelle, 206
Agostino (S.), 31
Alighieri, Dante, 41, 143, 152
aloni galattici, 101
Alpher, Ralph, 62–65
ammassi di galassie, 4, 71, 85, 99
analisi armonica, 122
Andromeda, *vedi* M31 in Andromeda, galassia
anisotropie della radiazione cosmica di fondo, 77–80, 104, 105, 109
  di dipolo, 82–84
anno luce, 3
Aristotele, 152, 182
armoniche, 119, 120, 132, 135, 204
Armstrong, Louis, 119
Armstrong, Neil, 90
assione, 103
atomi, 38, 50, 54

Baade, Walter, 35
Bahcall, John, 173
barioni, 53
Beethoven, Ludwig van, 127
Bethe, Hans, 62
Big Bang, 3, 8
  e formazione di strutture, 72, 94, 111
  e origine dello spaziotempo, 30, 31, 199
  e sintesi dei nuclei leggeri, *vedi* nucleosintesi primordiale
  ed età dell'Universo, 32, 34, 174
  ed evoluzione dell'Universo, 21, 32, 39, 41, 46, 49, 200
  fondamenti osservativi, 14, 53, 67–69, 111, 174, 210
  fondamenti teorici, 20, 21
  limiti del, 201–203
  origine del nome, 8
  problemi del, 86–88, 91
  teorie rivali, *vedi* stato stazionario
Bondi, Hermann, 67, 68
BOOMERANG, 148–151, 157–159, 161, 167–169, 171, 199
Borges, Jorge Luis, 187
Brahe, Tycho, 7
Bucchi, Massimo, 159
Burke, Bernard, 66

Calvino, Italo, 7
candela standard, 33
Cefeidi, 9, 34, 35, 165
cianogeno, 63
Cicerone, Marco Tullio, 113
COBE, 106–112, 144, 145, 151, 160, 168–171
Colombo, Cristoforo, 152
Conklin, Edward, 82
Copernico, Niccolò, 7, 187
Corey, Brian, 82
corpo nero, 46
  distribuzione energetica del, 47–50, 55, 56, 111, 112
cosmologia, 1
costante cosmologica, 162–164, 166, 172, 180–182, 186
costante di gravitazione universale, 32
costante di Hubble, 23, 32, 33, 35
Cramer, John, 174

curvatura dello spaziotempo, 18

DASI, 167–169, 171, 199
de Bernardis, Paolo, 148
de Vaucouleurs, Gérard, 84
densità critica dell'Universo, 23
densità dell'acqua, 23
densità dell'aria, 24
densità di radiazione del corpo nero, 77
densità media dell'Universo, 23, 30, 32, 35, 86, 88, 159, 171
  in barioni (atomi), 54, 102, 137, 162, 173
  in energia oscura, 166, 172
  in materia oscura, 102, 162, 172
deuterio, 52
Dicke, Robert, 65, 66, 86, 107
diffusione, 55, 135, 198
dimensioni extra, 204, 206
dipolo, *vedi* anisotropie della radiazione cosmica di fondo
disaccoppiamento, 56, 59, 77, 78, 196
distanze in cosmologia, 3, 9–11, 33–35, 49, 154
distribuzione energetica, 46
DMR, 107, 109, 111
Don Rodrigo, 56
Doppler, effetto, 44, 45, 78, 82
Doroshkevich, Andrei, 64

Eddington, Arthur, 62
effetto Doppler, *vedi* Doppler, effetto
Einstein, Albert, 15–20, 25, 26, 30–32, 37, 38, 43, 44, 62, 68, 77, 79–81, 95, 102, 154, 161, 162, 164, 172, 174, 180, 181, 188, 197
elettroni, 38, 56, 106, 195, 198
elio, 51
  abbondanza dell', 51–53
  formazione dell', *vedi* nucleosintesi primordiale
Eliot, Thomas Stearns, 177
energia del fotone, 44
energia del vuoto, 180, 181, 207
energia della radiazione elettromagnetica, 42
  nell'Universo in espansione, 49, 50, 55
energia di punto zero, 180
energia oscura, 183, 184, 186
equilibrio termico, 47, 49, 50, 55
Eratostene, 152–155, 160
espansione dell'Universo, 13, 14, 20, 21
  e geometria, 30
  accelerata, 91, 93, 163, 166, 180–184
  asimmetrica, 83
  e dimensioni extra, 205
  possibili modi di, 22, 23, 183
  significato dell', 30
  velocità di, *vedi* costante di Hubble
etere, 80

Feynman, Richard, 209
*fine tuning*, 87
FIRAS, 108, 111
Fitzgerald, Ella, 119
Fludd, Robert, 140
fluttuazioni quantistiche, 96
Ford, Kent, 100, 101
forza nucleare debole, 72
forza nucleare forte, 51
fotoni, 43, 44
  nell'Universo primordiale, 49, 50, 55–57
Fourier, Joseph, 122
Fowler, William, 67
frequenza, 41
frequenza di una corda vibrante, 118
frequenza fondamentale, 119
frequenze armoniche, *vedi* armoniche
Friedmann, Alexander, 20, 21, 31, 37, 61, 62, 67, 174
  modello cosmologico di, 20, 21, 23, 25, 161, 165
fusione nucleare, reazione di, 51

Galassia, 9

emissioni di microonde della, 105
velocità rispetto alla radiazione cosmica di fondo, 84
galassie, 9
curve di rotazione, 101
distribuzione nell'Universo, 85
relazione distanza-velocità, *vedi* legge di Hubble
Galilei, Galileo, 2, 7, 16
Gamow, George, 62–65, 67, 174
geometria dell'Universo, 28
misura della, 156, 159
geometria euclidea, 25
geometria non euclidea, 26
Georgi, Howard, 201
Glashow, Sheldon, 200
Gold, Thomas, 67, 68
Grande Attrattore, 85
gravitazione, 17
teoria di Einstein della, *vedi* teoria della relatività generale
teoria di Newton della, 18
Grossmann, Marcel, 17
Gruppo Locale, 83
Guth, Alan, 92, 97

Harrison, Edward, 97, 111
Hauser, Mike, 107, 108
Hawking, Stephen, 110
Heisenberg, Werner, 95
Henry, Paul, 82
Herman, Robert, 63–65
Herschel, William, 8, 9
Hertz, 41
Herzberg, Gerhard, 63
Hoyle, Fred, 8, 67, 68
Hubble, Edwin, 9–11, 14, 15, 20, 25, 31, 34, 35, 37, 38, 45, 46, 66, 79, 165, 174
*Vedi anche* costante di Hubble; legge di Hubble
Humason, Milton, 10, 11, 34

idrogeno, 51
abbondanza dell', 51
formazione dell', *vedi* ricombinazione
inflazione, 91–94, 96–98, 111, 133, 159, 168, 171, 197
instabilità gravitazionale, meccanismo di, 75
isotopi, 39
isotropia
dell'Universo, 20
della radiazione cosmica di fondo, 76

Jeans, James, 123, 124, 126

Kant, Immanuel, 9
Kelvin, 55
Keplero, Giovanni, 7, 113, 114, 123, 126, 140
Kolb, Edward "Rocky", 162

Landau, Lev, 67
Lange, Andrew, 148
Leavitt, Henrietta, 9, 34, 165
legge di Hubble, 12
deviazioni dalla, 84
legge di trasformazione, 16
Lemaître, Georges, 61, 62, 67, 174
lente gravitazionale, 101
luce, 41–46
velocità della, 3, 16
Lucrezio, 71
luminosità apparente, 33
luminosità assoluta, 33
lunghezza d'onda, 41
lunghezza di Planck, 203

M31 in Andromeda, galassia, 3, 10
Magellano, Ferdinando, 152, 161
materia oscura, 100–102
barionica, 102
e anisotropie della radiazione cosmica di fondo, 135, 136, 138–140, 178–180
e formazione di struttura, 103, 104
e neutrini, 103
non barionica, 102, 103
stime della, 102, 162, 166, 171, 172
Mather, John, 107, 108, 111, 210

MAXIMA, 148–151, 157–161, 167–169, 171
meccanica quantistica, 95, 180, 202
Michelson, Albert, 80
microonde, 43, 58, 105
Minkowski, Hermann, 17
modello elettrodebole, 200
monocordo, 116
Morley, Edward, 80

nebulose, *vedi* galassie
neutralino, 103
neutrini, 103
neutroni, 38
Newton, Isaac, 7, 17, 18, 24, 25, 27, 31, 32
Nobel, premio, 43, 63, 66, 111, 200, 209
Novikov, Igor, 64
nuclei atomici, 38
nucleosintesi primordiale, 51–53, 62
  e densità di barioni, 54, 102, 137, 173

Ohm, Edward, 64
omogeneità dell'Universo, 19, 76, 85
onda, 41
onde gravitazionali, 197
onde sonore, 117
orizzonte cosmologico, 89
oscillazioni acustiche, 126, 130–141, 168, 197
Ostriker, Jeremiah, 100
ottava, 116

parametri cosmologici, 36
Partridge, Bruce, 82
Peebles, James, 2, 65, 66, 81, 100, 134
Penzias, Arno, 63–66, 68, 76, 79, 80, 90, 107, 134, 168, 210
Perlmutter, Saul, 164, 165
perturbazioni di densità, 75, 77–79, 96–98, 112, 124–126, 130–134, 136–139
picchi acustici, 134–141, 159, 167, 171, 197
picchi Doppler, *vedi* picchi acustici
Pitagora, 113, 115–117, 119, 130, 139, 140
Planck (satellite), 177, 178, 180, 186, 193, 199
Planck, Max, 46
plasma, 40
Platone, 113, 152
polarizzazione, 194
Popper, Karl, 1
principio antropico, 182
principio cosmologico, 19, 76
principio di indeterminazione di Heisenberg, 95
principio di relatività, 15
problema della piattezza, 88
protoni, 38

quadrupolo, 195
quark, 38
Quinn, Helen, 201
quintessenza, 182

radiazione cosmica di fondo a microonde, 4, 58
  distribuzione energetica della, 111
  fluttuazioni di temperatura della, *vedi* anisotropie della radiazione cosmica di fondo
  polarizzazione della, 194–199
  scoperta della, 60–66
  temperatura della, 58, 63–66, 111
radiazione elettromagnetica, 41
radiometro, 66
radiometro differenziale, 82, 107
raggi luminosi, cammino dei, 155
*redshift*, 50
*redshift* gravitazionale, 78
Rees, Martin, 79, 195
reionizzazione, 198
Renzo e Lucia, 56
Richards, Paul, 148
ricombinazione, 56, 58, 104, 125, 128, 130
Riemann, Georg, 25, 26, 154, 161
Riess, Adam, 164, 165

Roll, Peter, 65, 66
Rubin, Vera, 83, 84, 100, 101
Rutherford, Ernest, 38

Sachs, Rainer, 79
Sakharov, Andrei, 134
Salam, Abdus, 200
scala di indicatori di distanze, 34
Sciama, Dennis, 79, 80
Silk, Joseph, 79, 135
singolarità, 201
Slipher, Vesto, 10
Smoot, George, 82, 83, 85, 105, 107, 109–111, 148, 210, 211
spaziotempo, 17
spettro delle fluttuazioni di temperatura della radiazione cosmica di fondo, 128–130, 133–141, 157, 159, 171
spettro elettromagnetico, 43
spettro sonoro, 121
stati della materia, 40
stato stazionario, 67, 68
Stradivari, Antonio, 119
Sunyaev, Rashid, 134
superammassi, 85
Superman, 21, 22
supernovae di tipo Ia, 164–166

Tantalo, 2
temperatura del corpo nero, 46, 77
temperatura dell'Universo, 39, 40, 52, 53, 55, 58
tempo di Planck, 203–205
teoria della relatività generale, 17
teoria della relatività speciale (o ristretta), 15
teoria delle stringhe, 203–207
teorie di campo quantistiche, 202
teorie di grande unificazione, 200
timbro, 119
TOCO, 151
topologia dell'Universo, 188–194
Turner, Ken, 66

velocità della luce, 3, 16
velocità di espansione dell'Universo, *vedi* costante di Hubble
velocità di fuga, 21
velocità peculiare, 84
Vergine, superammasso della, 85
Via Lattea, *vedi* Galassia

Weinberg, Steven, 200, 201
Wheeler, John, 19
Wilkinson, David, 65, 66, 81, 82, 168
Wilson, Robert, 63–66, 68, 76, 79, 80, 90, 107, 134, 168, 210
WMAP, 169–171, 173, 174, 177–179, 186, 193, 199
Wolfe, Arthur, 79

Yu, Jar, 134

Zel'dovich, Yakov, 97, 111, 134
zero assoluto, 55
Zeus, 2, 155
Zwicky, Fritz, 84, 99